



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KATRI EKHOLM
EROOSIOKORROOSION JA VESIPISARAEROOSION HALLINTA
VASTAPAINETURBIINISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Petri Vuoristo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
29. marraskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

KATRI EKHOLM: Eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion hallinta vastapaineturbiinissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 118 sivua, 11 liitesivua

Marraskuu 2017

Materiaalitekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Materials Science

Tarkastaja: professori Petri Vuoristo

Avainsanat: höyryturbiini, vastapaineturbiini, eroosiokorroosio, vesipisaraeroosio

Tässä diplomityössä tutkittiin Helen Oy:n voimalaitosten vastapaineturbiineissa esiintyneitä eroosiokorroosiota ja vesipisaraeroosiota. Työssä tutkittiin, kuinka turbiinin paisuntakäyrän sijainti Mollier-diagrammissa vaikuttaa materiaaliongelmiin ilmenemiseen. Paisuntakäyrän sijaintia arvioitiin turbiinin tulohöyryn lämpötilan ja paineen sekä turbiinin vastapaineen avulla. Koska turbiinin vastapaineeseen vaikuttaa kaukolämpövesien lämpötilat, lämpötilojen ja vastapaineiden yhteyttä tutkittiin voimalaitosten prosessidatan perusteella. Vastapaineturbiinien paisuntojen lisäksi työssä selvitettiin eri höyryturbiinien materiaalien eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion kestoja.

Tutkimuksissa havaittiin, että Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisunta kulkee vakavan eroosiokorroosioalueen läpi ja päättyy vesipisaraeroosion alueeseen. Koska turbiinin pesä ja johtosiipikiekot on valmistettu matalaseosteisesta hiiliteräksestä, eivät materiaalit ole kestäneet turbiinin höyryn paisunnan olosuhteita. Turbiinin johtosiipikiekkoille ja pesälle suunniteltiin ja toteutettiin korjaukset, joiden avulla turbiinin materiaalien keston oletetaan paranevan. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin vertailuksi myös Vuosaaren ja Hanasaaren voimalaitosten vastapaineturbiinien peräpäitä tutkittiin. Vuosaaren välipaineturbiinin paisunnan havaittiin kulkevan välillä eroosiokorroosioalueen läpi, mikä oli havaittavissa Vuosaaren turbiinin materiaaleissa. Vuosaaren turbiinin pesä on valmistettu paremmin eroosiokorroosiota kestävästä materiaalista, eikä kuluminen ollut yhtä voimakasta kuin Salmisaaren turbiinissa. Hanasaaren välipaineturbiinin paisunta ei sijoitu materiaaleille vaativalle alueelle, mutta myös Hanasaaren turbiinin pesän peräpäässä havaittiin Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitosten höyryturbiinien vaurioihin verrattavia vaurioita. Hanasaarella vauriot olivat muodostuneet vuosikymmenien aikana, eivätkä ne vaadi toimenpiteitä. Jokaiselle turbiinille määritettiin paisunnan rajakäyrä, joka minimoisi turbiinin materiaalien vaurioitumisen. Hanasaaren turbiinin tulohöyrylle ei tarvitse tehdä toimenpiteitä, mutta Salmisaaren ja Vuosaaren turbiinien tulohöyryjen arvoja suositellaan muutettavaksi, jos voimalaitoksen prosessi sen sallii.

Materiaalien kunnon lisäksi työssä selvitettiin turbiinin vastapaineen ja kaukolämpövesien lämpötilan yhteyttä. Turbiinin viimeisten välilottojen vastapaineisiin vaikuttaa kaukolämmön menoveden lämpötila ja kaukolämmön paluueden lämpötila. Kaukolämmön menoveden lämpötilojen alentamisen yhteydessä vastapaineturbiinien viimeisten välilottojen paineita tulee tarkkailla.

ABSTRACT

KATRI EKHOLM: The Control of Erosion-corrosion and Water Droplet Erosion in Back-pressure turbines

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 118 pages, 11 Appendix pages

November 2017

Master's Degree Programme in Materials Science and Engineering

Major: Materials Science

Examiner: Professor Petri Vuoristo

Keywords: Back-pressure turbine, Steam turbine, Erosion-corrosion, Water droplet erosion

In this Master's thesis, erosion-corrosion and water droplet erosion in back-pressure turbines are studied. The influence of the location of the expansion curve in Mollier-diagram to these materials phenomena were examined. The location of the expansion curve depends on the steam inlet temperature and pressure. The back-pressure of studied steam turbines is affected by district heating water temperatures. In addition to the location of the expansion curve, erosion-corrosion and water droplet erosion resistance of steam turbine materials were examined.

It was found that the steam expansion of the inter-pressure steam turbine in power plant in Salmisaari passes through severe erosion-corrosion region and ends to water droplet erosion region. Since the turbine casing and diaphragms are manufactured from low-alloy carbon steel, materials have been corroded. The turbine case and diaphragms were repaired and protected to stand erosion corrosion and water droplet erosion. Casings and last running blades of back-pressure turbines in Vuosaari and Hanasaari were studied. The expansion curve of inter-pressure turbine in Vuosaari passes through erosion corrosion region. The casing of the inter-pressure turbine was corroded by erosion-corrosion. Erosion-corrosion in Vuosaari was not as severe as in Salmisaari, since the casing of turbine in Vuosaari has been manufactured with more corrosion resist material. The expansion curve of the inter-pressure turbine in Hanasaari does not pass regions, which are challenging for the materials. However, the casing in Hanasaari were found to have similar problems with casings in Salmisaari and Vuosaari. Corrosion in Hanasaari had developed during decades and does not require repairing. For every back-pressure turbine an expansion curve, which would be optimal for materials, were defined. Processes in Salmisaari and Vuosaari should be examined, if the inlet steam temperature could be raised and inlet steam pressure lowered.

In addition to studies about erosion-corrosion and water droplet erosion, the relation between back-pressure and district heating water temperatures were examined. The back-pressure of last bleeds in turbines is affected by the temperature of district heating supply and return waters. If the district heating supply water temperature is lowered, steam turbine back-pressures should be monitored.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Helen Oy:n tilauksesta selvittää sallivatko voimalaitosten materiaalit kaukolämmön menoveden lämpötilaa laskemisen. Kaukolämpövesien lämpötilojen tiedettiin vaikuttavan vastapaineturbiinien peräpäiden kosteuspitoisuuksiin, mutta kosteuden vaikutusta haluttiin selvittää. Lisäksi osana tätä diplomityötä haluttiin selvittää Salmisaaren välipaineturbiinien materiaalien ongelmien syyt ja suunnitella tarvittavat korjaustoimenpiteet. Tehdyt tutkimukset ja korjaustoimenpiteiden suunnittelut toteutettiin itsenäisesti Helen Oy:n asiantuntijoiden avustuksella.

Haluan kiittää Helen Oy:tä mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitän työn ohjaajaa Juha Viuhkolle saamastani mahdollisuudesta ja tuesta diplomityötä tehdessä. Kiitän myös Tampereen teknillisen yliopiston professori Petri Vuoristoa työni tarkastamisesta. Haluan kiittää Helen Oy:n johtavaa asiantuntijaa Jarmo Ivaskaa saamastani höyryturbiineihin liittyvästä tiedosta, sekä erityisesti saamastani luottamuksesta ja vastuusta Salmisaaren välipaineturbiinin korjaustoimenpiteiden suunnittelussa ja toteutuksessa; projektin toteutus on ollut merkittävä omalle ammatilliselle itsetunnolleni. Kiitän myös Sofia Grönroosia ja Petteri Rasilaa ajatuksia herättävistä keskusteluista.

Haluan kiittää myös ystäviäni ja urrheilujoukkue NMKSV:tä, jotka tekivät opiskelujajastani ikimuistoisen. Erityiskiitos äidilleni, joka on pyyteettömästi ollut tukenani ja auttanut minua kaikissa elämäni vaiheissa. Haluan kiittää myös edesmennyttä isääni, joka lapsuudestani lähtien ruokki kiinnostustani luonnontieteisiin ja tekniikkaan, ja jonka avulla löysin kiinnostukseni materiaalitieteisiin ja energiatekniikkaan.

Helsingissä, 18.11.2017

Katri Ekholm

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	VASTAPAINOVOIMALAITOKSET	3
2.1	Voimalaitokset	3
2.1.1	Höyryturbiinit	5
2.1.2	Kaukolämmönvaihtimet	10
2.2	Kaukolämpöverkko	11
2.3	Kaukolämpöveden lämpötilan ja voimalaitoskomponenttien yhteys	13
3.	VASTAPAINETURBIINIEN MATERIAALIONGELMAT	15
3.1	Eroosiokorroosio ja virtauksen kiihdyttämä korroosio	17
3.2	Vesipisaraeroosio	22
4.	CASE STUDY: SALMISAAREN VOIMALAITOKSEN VÄLIPAINETURBIININ MATERIAALIONGELMAT	35
4.1	Turbiinin tila vuosihuollossa 2017	37
4.1.1	Pesä	38
4.1.2	Johtosiipikiekot	44
4.1.3	Juoksusiivet ja roottori	50
4.2	Vaurioiden yhteys turbiinin paisuntaan	53
4.2.1	Eroosiokorroosio Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa 53	
4.2.2	Vesipisaraeroosio Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa 55	
4.3	Tehdyt korjaustoimenpiteet vuonna 2017	65
4.3.1	Pinnoitus	65
4.3.2	Johtosiipikiekkojen korjaus	68
4.3.3	Pesän jakotason tiiveyden varmistaminen	72
4.4	Tulevaisuuden korjaustarve	74
4.5	Muut tutkimukset	76
4.5.1	Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihtimet	77
4.5.2	Vuosaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiini	79
4.5.3	Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiini	82
5.	TURBIININ PAISUNNAN JA MATERIAALIONGELMIEN VÄLINEN YHTEYS	86
5.1	Turbiinin vastapaineiden riippuvuus kaukolämpövesien lämpötiloista	86
5.1.1	Hanasaaren voimalaitoksen prosessidata	86
5.1.2	Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamiskokeilu	90
5.2	Turbiinin paisunnan riippuvuus tulohöyryn parametreista	94
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	99
7.	YHTEENVETO	117
	LÄHTEET	119

LIITE 1: MOLLIER-DIAGRAMMI

LIITE 2: TYYPILLISET MATERIAALIONGELMAT MOLLIER-DIAGRAMMIN
ERI ALUEILLA

LIITE 3: SALMISAAREN VOIMALAITOKSEN VP-PESÄ 2017

LIITE 4: SALMISAAREN VOIMALAITOKSEN JOHTOSIIPIKIEKOT 2017

LIITE 5: SALMISAAREN VOIMALAITOKSEN KLV:T 2017

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Ote Salmisaaren B-voimalaitoksen pääputkistokaaviosta [7].	4
Kuva 2.	Hanasaaren voimalaitoksen T3-höyryturbiinin korkea- ja välipainepesät [13].	7
Kuva 3.	Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin johtosiipikiekko [17].	7
Kuva 4.	Roottorin ja johtosiipikiekon välinen labyrinttitiiviste.	8
Kuva 5.	Aktioturbiinien juoksusiipien hunajakennotiivisteen periaate.	9
Kuva 6.	Vaippaputkikaukolämmönvaihtimen toimintaperiaate.	10
Kuva 7.	Raudan Pourbaix-diagrammi 25 °C:ssa [12].	17
Kuva 8.	Matalaseosteisen teräksen eroosiokorroosio	18
Kuva 9.	Magneiitin liukoisuus eri pH-arvoilla [12].	19
Kuva 10.	Eroosiokorroosion ilmeneminen Mollier-diagrammin alueilla. I) Lievä eroosiokorroosio, II) vakava eroosiokorroosio, III) erittäin vakava eroosiokorroosio [12; 45].	20
Kuva 11.	Kolmen eri voimalaitoksilla käytetyn teräslaadun eroosiokorroosion aiheuttaman materiaalin kulumisen riippuvuus lämpötilasta [12].	21
Kuva 12.	Eroosioasteen muutos vakio-olosuhteissa ajan suhteen.	23
Kuva 13.	Pisaroiden kondensoituminen, vesikalvojen muodostuminen johtosiiville ja pisaroiden iskeytyminen juoksusiipien kärkiin.	24
Kuva 14.	Vesipisaran iskeytymisestä aiheutuvan shokkiaallon ja pinnan mukaisen virtauksen muodostuminen.	26
Kuva 15.	Toistuvien pisaran iskeytymisten aiheuttama plastinen muodonmuutos ja perusaineen säröytyminen, punainen osoittaa jännityksen jakautumisen materiaalisia.	28
Kuva 16.	Pisaran iskeytyminen epätasaiselle pinnalle.	31
Kuva 17.	Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiini.	36
Kuva 18.	Salmisaaren turbiinin vp-pesän poikkileikkaus [65].	36
Kuva 19.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin suunniteltu paisunta Mollier-diagrammissa.	37
Kuva 20.	Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin jakotasossa oli havaittavissa höyryvuodosta seurannutta ruostetta jo ennen turbiinin avausta.	38
Kuva 21.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin sisällä sijaitsevat jakotason pultit; vasemmalla generaattorin päästä, oikealla turbiinin keskeltä.	39
Kuva 22.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin generaattorin pää (Vo1) ennen turbiinin avaamista.	39

Kuva 23.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin viimeiset väliotot ennen turbiinin avaamista; Vo1 (vasen) ja Vo0 (oikea).</i>	40
Kuva 24.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän yläosa, generaattorin pääty (Vo1), tukitangot ja diffuusori; oikealla lähikuva tukitangosta.</i>	40
Kuva 25.	<i>Salmisaaren vp-turbiinin pesän yläosa, generaattorin päädyn tukitanko, lähikuva.</i>	41
Kuva 26.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän yläosa, kp-pääty (Vo0).</i>	41
Kuva 27.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason läpipuhallusjäljet.</i>	42
Kuva 28.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason kuluminen tiivisteinä olleen grafiittinauhan vierestä.</i>	42
Kuva 29.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason rakokorroosio.</i>	43
Kuva 30.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason kuluminen johtosiipikiekon vierestä.</i>	43
Kuva 31.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotaso; vasemmalla johtosiipikiekko pesään kiinnitettynä, oikealla pesästä telineeseen nostettuna ja puhdistettuna.</i>	45
Kuva 32.	<i>Lähikuva Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon johtosiiven ja jakotason korjaushitsin välisestä kulumisesta.</i>	45
Kuva 33.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotason korjaushitsien viereisen perusaineen kulumaa; vasemmalla jakotason ja johtosiiven välinen kulma, oikealla jakotason ja pystytiivistepinnan välinen reuna.</i>	46
Kuva 34.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotaso ja jakotason kiilan puhallusjäljet.</i>	46
Kuva 35.	<i>Jakson 2 johtosiipikiekon pystytiivistepinnalla havaitut puhallusjäljet.</i>	47
Kuva 36.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 2 jättöpuolen pinnan korroosio; vasemmalla ennen hiekkapuhallusta ja oikealla hiekkapuhalluksen jälkeen.</i>	48
Kuva 37.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 3 johtosiipikiekon tulopuolen pinta.</i>	48
Kuva 38.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 5a pinta.</i>	49
Kuva 39.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 5a juoksusiipien kärkien viereinen pinta.</i>	49
Kuva 40.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin toisen jakson juoksusiipi (keltainen), kiinnityksen säröytymisen riskialueet punaisella.</i>	51

Kuva 41.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin roottori nostettuna pois turbiinin pesästä.	51
Kuva 42.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin roottorin kiekkojen tasapainotuspalat.	52
Kuva 43.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 5a juoksusiipien vesipisaraeroosio.....	52
Kuva 44.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 5a juoksusiiven vahvistuksen ja perusaineen raja.	53
Kuva 45.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 4a juoksusiiven kärjen vesipisaraeroosio.	53
Kuva 46.	Eroosiokorroosioalueen sijoittuminen Mollier-diagrammissa (punainen alue) ja SaB vp-paisuntakäyrä tulohöyryn arvoilla 187 °C ja 9,1 bar. I) Lievä, II) vakava, III) erittäin vakava eroosiokorroosio.....	54
Kuva 47.	Määritetty vesipisaraeroosion alue: ylempi käyrä rajaa lievän ja alempi voimakkaan vesipisaraeroosion alueen.....	61
Kuva 48.	SaB vp-turbiinin paisuntakäyrän sijoittuminen eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion alueille, tulohöyryn arvoilla 187 °C ja 9,1 bar, kaukolämmön paluuv veden ollessa 40 °C; vaaleansininen osoittaa 7 % kosteuden rajan.	62
Kuva 49.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinien vesipisaraeroosion kesto (Taulukon 11 arvot).....	63
Kuva 50.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin eri materiaalien vesipisaraeroosion aste erikokoisilla pisaroilla (Taulukon 12 arvot).	65
Kuva 51.	Kaariruiskutus pistoolin periaate.....	67
Kuva 52.	Johtosiipikiekon jakotason kulumisen höyryvuodon seurauksena.....	69
Kuva 53.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 2 jakotason korjaushitsauksia [85].	70
Kuva 54.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 3a jakotason pinnoitus [85].....	71
Kuva 55.	Pinnoitettu Salmisaaren vp-turbiinin johtosiipikiekko: vasemmalla karusellisorviin asennettuna pinnoituksen jälkeen; oikealla koneistettu ja valmis pystytiivistepinta.	71
Kuva 56.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason eroosio stopparin koneistettu ura.	73
Kuva 57.	Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin eroosio stopparihitsit ennen koneistusta ja koneistuksen jälkeen.	73
Kuva 58.	Salmisaaren voimalaitoksen KLV1:n päällimmäisten umpitankojen kulunut pinta.	78
Kuva 59.	Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisunta, kun tulohöyryn lämpötila on 190 °C ja paine 6 bar.	79

Kuva 60.	<i>VuB vp-turbiinin Vo1:n eroosiokorroosio.</i>	80
Kuva 61.	<i>VuB vp-turbiinin Vo0:n eroosiokorroosio.</i>	80
Kuva 62.	<i>VuB vp-turbiinin Vo0:n puoleisisten viimeisten juoksusiipien tuloreunassa oli havaittavissa pieniä merkkejä pisaraeroosiosta.</i>	81
Kuva 63.	<i>VuB vp-turbiinin Vo0:n tukitanko diffuusorin vierestä.</i>	81
Kuva 64.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnat tulohöyryn lämpötilalla 535 °C ja paineilla 50 bar ja 30 bar.</i>	83
Kuva 65.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen T3:n välipainepesän viimeiset juoksusiivet ja Vo0.</i>	83
Kuva 66.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen T3-vp:n takaseinä Vo0.</i>	84
Kuva 67.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen T3:n Vo0:n seinät.</i>	84
Kuva 68.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet, 3.-5.1.2017.</i>	87
Kuva 69.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet, 3.1.-19.2.2017.</i>	87
Kuva 70.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet 1.1.-31.7.2017.</i>	88
Kuva 71.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vastapaineiden ja kaukolämmön menoveden lämpötilan välinen yhteys aikavälillä 1.1.-31.7.2017.</i>	88
Kuva 72.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vastapaineiden ja kaukolämmön paluuv veden lämpötilan välinen yhteys tarkasteluvälillä 1.1.-31.7.2017.</i>	89
Kuva 73.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpövesien lämpötilojen välinen yhteys.</i>	89
Kuva 74.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen kokeilun aikaiset kaukolämpöveden sekä Vo0:n ja Vo1: höyryn lämpötilat.</i>	91
Kuva 75.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen tulohöyryn lämpötilat ja paineet sekä pätöteho keväällä 2017.</i>	95
Kuva 76.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrät tulohöyryn lämpötiloilla 180 °C, 190 °C ja 200 °C 9 bar paineella.</i>	95
Kuva 77.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrät tulohöyryn ollessa 200 °C ja 9 bar sekä 200 °C ja 7 bar.</i>	96
Kuva 78.	<i>Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn arvot ja pätöteho, 10/2016-5/2017.</i>	96
Kuva 79.	<i>Vuosaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiinin paisunnat tulohöyryn arvoilla 190 °C ja 6 bar, 220 °C ja 6 bar, 180 °C ja 2,5 bar sekä 180 °C ja 1,5 bar.</i>	97
Kuva 80.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn arvot ja teho.</i>	97
Kuva 81.	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnat tulohöyryn arvoilla 500 °C ja 60 bar, 530 °C ja 60 bar, 500 °C ja 40 bar sekä 530 °C ja 40 bar.</i>	98
Kuva 82.	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrät.</i>	104

<i>Kuva 83.</i>	<i>Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 18).....</i>	<i>106</i>
<i>Kuva 84.</i>	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinien paisunnan rajakäyrä.....</i>	<i>109</i>
<i>Kuva 85.</i>	<i>Hanasaaren voimalaitoksen vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 19).....</i>	<i>111</i>
<i>Kuva 86.</i>	<i>Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrät.</i>	<i>112</i>
<i>Kuva 87.</i>	<i>Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 20).....</i>	<i>113</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFD	Laskennallinen virtausmallinnus (Computational Fluid Dynamics)
FAC	virtauksen kiihdyttämä korroosio (flow accelerated corrosion)
HaB	Hanasaaren B-voimalaitos
HT	Höyryturbiini
KLV	Kaukolämmönvaihdin
KP	Korkeapaine
LEL	Lauhteenesilämmitin
MP	Matalapaine
SaB	Salmisaaren B-voimalaitos
SEL	Syöttöveden esilämmitin
Vo	Väliotto
VP	Välipaine
VuA	Vuosaaren A-voimalaitos
VuB	Vuosaaren B-voimalaitos
ε	myötymä
η	hyötysuhde
θ	pisaran kontaktikulma
ρ	nesteen tiheys
ρ_l	veden tiheys
σ	pintajännitys
σ_m	murtolujuus
a	vakio (kts eroosioasteen kaavat ja varmista, mikä vakio)
C_s	shokkiaallon nopeus nesteessä
C_0	äänennopeus nesteessä
d	pisaran halkaisija
E	vesipisaraerosion vertailuarvo
E	kimmomoduuli
H	entalpia
k	lämmönjohtavuus
K	turbiinikohtainen siipien rakenteesta ja sijainnista riippuva vakio
L	höyrystymislämpö
n	materiaalikohtainen vakio
NER	eroosionkestonumero
NOR	eroosion itämisvastusnumero
p_0	höyrynpaine
P	paine
r	pisaran säde
Re	eroosioaste
R_m	murtolujuus
$R_{p0,2}$	0,2% myötöraja
S	entropia
t	aika
T	lämpötila (Kelvineinä)
u	juoksusiiven kehänopeus
V	pisaran iskeytymisnopeus
V_C	iskeytymisnopeuden kynnysarvo
y	höyrynkosteus

1. JOHDANTO

Sähköä ja kaukolämpöä tuottavissa voimalaitoksissa sähköä tuotetaan vastapainehöyryturbiineilla. Kosteaa höyryä alueilla toimivien höyryturbiinien merkittävimmät materiaaliongelmat ovat eroosiokorroosio ja vesipisaraeroosio. Kaukolämpöveden lämpötilat vaikuttavat höyryturbiinin vastapaineeseen. Helen Oy:ssä on pohdittu kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamista. Tämän diplomityön alkuperäisenä tavoitteena oli selvittää sallivatko voimalaitosten materiaalit kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamisen. Lisäksi tavoitteena oli selvittää Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa ilmenneiden materiaaliongelmien syy ja suunnitella tarvittavat korjaustoimenpiteet. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin tutkiminen osoitti, että vastapaineen lisäksi turbiiniin tulohöyryä lämpötila ja paine vaikuttavat turbiinin materiaalien kestoon.

Työssä diplomityössä Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin materiaalien kuntoa verrataan Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten välipaineturbiineihin. Turbiinien kunnan ja paisuntojen vertailun avulla on mahdollista arvioida höyryturbiinien materiaalien kestoa erilaisissa kosteaa höyryä olosuhteissa. Turbiinien kunnan lisäksi työssä tutkitaan kaukolämpöveden lämpötilan vaikutusta höyryturbiinien vastapaineeseen ja turbiinien materiaalien kestoon.

Tutkimus on rajattu käsittelemään Salmisaaren, Hanasaaren ja Vuosaaren B-voimalaitosten välipaineturbiineja. Vastapaineturbiinien lisäksi vaikutukset näkyvät kaukolämmönvaihtimissa, joten tutkimuksissa huomioidaan höyryturbiineihin liitetyt kaukolämmönvaihtimet. Tässä diplomityössä ei käsitellä kaukolämpöverkon komponenttien materiaalien kestoa, vaan työ rajataan voimalaitosten komponentteihin. Tämä diplomityö ei ota kantaa kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoinnin rahalliseen kannattavuuteen. Kaukolämpöverkon käyttäytymistä analysoidaan vain siltä osin kuin vaikutusten oletetaan näkymään voimalaitosten materiaalien kestosta.

Työn tavoitteena on selvittää, mitkä ovat vastapaineturbiinien materiaaleille vaikeita höyryä olosuhteita ja voidaanko turbiinien tulohöyryä arvoja ja vastapaineita säättämällä estää materiaaliongelmien ilmeneminen. Tutkimusten perusteella pyritään selvittämään, kuinka erilaiset höyryturbiinien materiaalit kestävät turbiinien eroosiokorroosiota ja vesipisaraeroosiota sekä onko materiaalien kestoa mahdollista parantaa. Koska kaukolämpövesien lämpötilat vaikuttavat turbiinin vastapaineeseen, osana työssä tutkitaan turbiinin vastapaineiden ja kaukolämpövesien välistä yhteyttä.

Työn toinen luku esittelee Helen Oy:n vastapainevoimalaitosten höyryturbiiniprosessien erityispiirteet. Kyseisessä luku selvittää työssä käsiteltyjen vastapaineturbiinien toiminnan. Lisäksi luku selvittää kaukolämmönvaihdinten toimintaperiaatteen sekä kaukolämpöverkon ja voimalaitosten yhteyden. Työn kolmas luku käsittelee vastapaineturbiinien materiaaliongelmia. Luku esittelee eroosiokorroosion, virtauksen kiihdyttämän korroosion (FAC:n) sekä vesipisaraeroosion mekanismit ja kuinka materiaalivalinnat vaikuttavat ilmiöiden esiintymiseen. Neljännessä luvussa on tutkittu Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin materiaalien kuntoa vuonna 2017, raportoitu esiintyneet vauriot ja tehdyt korjaustoimenpiteet. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin kunnon lisäksi luku neljä esittelee Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten sekä Vuosaaren ja Hanasaaren voimalaitosten vastapaineturbiinien peräpäiden kunnon vuoden 2017 vuosihuollon aikana. Työn viidennessä luvussa tutkitaan turbiinin höyryn paisunnan yhteyttä vastapaineturbiinien materiaaliongelmiin. Luvussa käsitellään kaukolämpövesien yhteyttä turbiinin vastapaineeseen sekä tulohöyryn lämpötilan ja paineen vaikutusta turbiinin höyryn paisuntaan. Luvussa kuusi esitellään tutkimusten perusteella tehdyt johtopäätökset ja määritetään Helen Oy:n turbiineille paisunnan rajakäyrät. Viimeinen luku on työn yhteenveto.

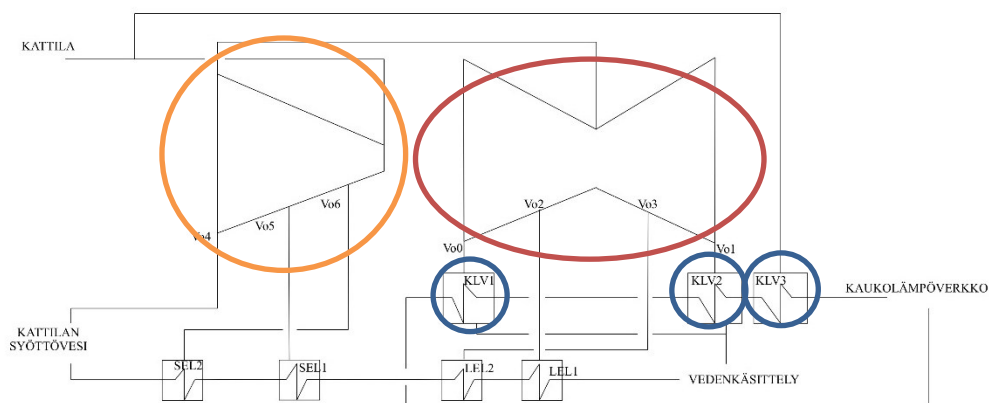
2. VASTAPAINOVOIMALAITOKSET

Helen Oy:llä on Helsingissä voimalaitokset Hanasaassa, Salmisaassa ja Vuosaares-
sa. Kaikki kolme voimalaitosta ovat yhteiskäyttövoimalaitoksia, eli suunniteltu tuotta-
maan sähköä ja kaukolämpöä. Tuottamalla sähkön ohella kaukolämpöä, voimalaitoksen
hyötysuhdetta voidaan nostaa merkittävästi ja näin säästää energiaa ja vähentää päästö-
jen määrää [1]. Helen Oy:n voimalaitoksilla pystytään tuottamaan energiaa yli 90 %
hyötysuhteella [2]. Kun voimalaitoksella tuotetaan sähkön lisäksi kaukolämpöä, voima-
laitosta ei optimoida tuottamaan maksimisähkötehoa. Voimalaitosten lisäksi Helsingissä
kaukolämpöä tuotetaan lämpökeskuksilla. Lämpökeskukset ovat etäkäyttöisiä ja ne
käynnistetään tukemaan yhteistuotantolaitosten tuotantoa etenkin kovilla pakkasilla se-
kä häiriötilanteissa ja seisokkien aikana. Helen Oy:llä on Salmisaassa ja Vuosaares-
sa kaukolämpöakut, joihin voidaan varastoida lämpöä lämmönkulutuksen huippujen aikai-
sen energiasaannin varmistamiseksi [2].

Tässä kappaleessa esitellään tämän diplomityön kannalta oleelliset voimalaitoskom-
ponentit, kaukolämpöprosessin erityispiirteet sekä kaukolämmön menoveden lämpötilan
optimoinnin periaate ja optimoinnin oletetut vaikutukset voimalaitosprosessiin.

2.1 Voimalaitokset

Helen Oy:n voimalaitokset ovat valmistuneet eri vuosikymmenillä. Hanasaaren B-
voimalaitos otettiin käyttöön vuonna 1974. Hanasaaren voimalaitoksessa vesi kuumen-
netaan höyryksi kahdessa hiiltä ja puupellettiä polttavassa kattilassa, joista höyryn läm-
pöenergia muutetaan sähköksi höyryturbiineilla ja lämmöksi kaukolämmönvaihtimilla.
Hanasaassa sähköä tuotetaan 220 MW ja lämpöä 420 MW. [3] Hanasaaren voimalai-
toksen kattilat on numeroitu K3 ja K4. Kattiloiden prosessit vastaavat toisiaan, joten nii-
tä voidaan tarkastella samanlaisina. Vuonna 1984 valmistuneessa Salmisaaren B-
voimalaitoksessa energia tuotetaan hiilellä ja pelletillä. Salmisaaren voimalaitoksessa
energiaa voidaan tuottaa 160 MW sähköä ja 300 MW lämpöä [4]. Salmisaaren voima-
laitoksessa energia tuotetaan yhdellä, Hanasaaren voimalaitoksen kattiloita isommalla
kattilalla. Vuosaaren A ja B kombivoimalaitoksilla energia tuotetaan polttamalla maa-
kaasua. Kombivoimalaitoksessa sähköä tuotetaan kahdessa piirissä: ensimmäisessä pii-
rissä sähkö kerätään polttamalla maakaasua kaasuturbiinissa, josta savukaasu johdetaan
kattilaan. Toisessa piirissä kattilassa lämmitetty vesihöyry tuottaa sähköä höyryturbiinil-
la. [5] Tarvittaessa osa energiasta voidaan muuttaa sähkön sijaan lämmöksi kaukoläm-
mönvaihtimilla. Vuosaaren voimalaitokset tuottavat sähköä yhteensä 630 MW ja läm-
pöä 580 MW. Vuosaaren A-laitos on otettu käyttöön 1991 ja B-laitos 1998 [6].



Kuva 1. Ote Salmisaaren B-voimalaitoksen pääputkistokaaviosta [7].

Kuvassa 1 on esitelty riisuttu versio Salmisaaren B-voimalaitoksen pääputkistokaavion höyryturbiiniin liittyvistä laitteista. Kuvassa vasemmalla oranssi ympyrä osoittaa korkeapaineturbiinin, oikealla punainen soikio välipaineturbiinin ja siniset pienet ympyrät kaukolämmönvaihtimet (KLV). Kattilasta tulistettu höyry tulee höyryturbiinin korkeapainepesän kapeaan päähän. Korkeapaineturbiinin väliotoista (Vo) osa höyrystä johdetaan syöttöveden esilämmittimille (SEL) ja syöttövesisäiliöön, suurin osa höyrystä vietään ylivirtausputkea pitkin välipainepesään. Välipainepesän väliotoista osa höyrystä kulkee lauhtenesilämmittimille (LEL) ja suurin osa kaukolämmönvaihtimille 1 ja 2. Kaukolämmönvaihtimilla höyrystä lämpöenergia otetaan talteen kaukolämpöveeten. Kun höyry luovuttaa energiaa kaukolämpöveeten, höyry lauhtuu ja lauhde ohjataan vedenkäsittelyn ja esilämmityksen kautta takaisin kattilan syöttövesisäiliöön.

Hanasaaren voimalaitoksen turbiiniprosessin kannalta merkittävin ero Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitosten prosesseihin verrattuna on, että Hanasaaren voimalaitoksessa höyry välitulistetaan turbiinin korkea- ja välipainepesien välillä. Välitulistuksen avulla höyryyn saadaan sidottua lisää energiaa ja näin välipaineturbiinista saatavan tehon määrää kasvatettua. Hanasaaren voimalaitoksessa turbiinin kaikki väliotot sijaitsevat välipainepesässä. Vuosaaren B-voimalaitoksella voidaan kaukolämmön sijaan tuottaa kaikki saatava energia sähkötehona. Jos Vuosaaren voimalaitoksessa tuotetaan pelkkää sähköä, höyry johdetaan välipaineturbiinista matalapaineturbiiniin, jossa höyry lauhtuu.

Tässä diplomityössä keskitytään voimalaitoskomponentteihin, jotka yhdistävät voimalaitos- ja kaukolämpöprosessit. Tutkimuksen pääpaino on vastapainehöyryturbiineissa, mutta kaukolämpöprosessin muutokset näkyvät myös KLV:issa. Näiden voimalaitoskomponenttien toiminta esitellään tarkemmin kappaleissa 2.1.1 Höyryturbiinit ja 2.1.2 Kaukolämmönvaihtimet. Höyryturbiinien ja kaukolämmönvaihtimien lisäksi turbiinin tulohöyryn ja vastapaineen säätö vaikuttaa voimalaitoksen komponentteihin, jotka ovat yhteydessä vastapainehöyryturbiinin aikaisempiin väliottoihin.

2.1.1 Höryturbiinit

Turbiinit jaetaan korkea- (kp), väli- (vp) ja matalapaineturbiineihin (mp) riippuen höyryn paineesta, paisunnasta ja prosessista. Kattilalta tulistettu höyry ohjataan korkeapaineturbiinille. Korkeapaineturbiinilta höyry ohjataan välipaineturbiiniin, josta höyry johdetaan kaukolämmönvaihtimille tai matalapaineturbiiniin.

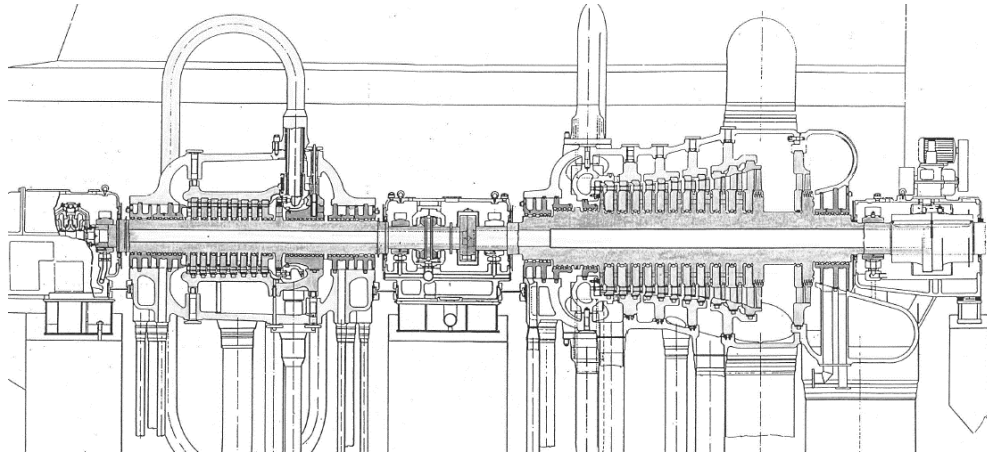
Koska kaikilla Helen Oy:n voimalaitoksilla on mahdollista tuottaa sähkön lisäksi kaukolämpöä, laitosten turbiiniprosesseilla on yhtenäisiä piirteitä. Kaikkien laitosten prosessit poikkeavat kuitenkin toisistaan. Kuten aiemmin mainittu, Salmisaaren voimalaitoksen höryturbiini koostuu korkea- ja välipainepestistä. Salmisaaren voimalaitoksen turbiini modernisoitiin kokonaisuudessaan vuonna 2012. Salmisaaren voimalaitoksen korkeapaineturbiinissa on 16 ja välipaineturbiinissa 9 jaksoa. Hanasaaren voimalaitoksella on kaksi höryturbiinia (T3 ja T4), jotka vastaavat pitkälti toisiaan ja tämän diplomityön tarkastelutasolla niiden voidaan katsoa olevan toiminnaltaan yhtäläiset. Hanasaaren voimalaitoksen höryturbiinit koostuvat korkea- ja välipainepestistä. Hanasaaren voimalaitoksen höryturbiinit on modernisoitu 2005 ja 2008. Vuonna 2005 modernisoidussa T3:ssa on edelleen käytössä alkuperäisen turbiinin roottorien takeet, mutta T4:n modernisoinnissa molempien pesien roottorit uusittiin. Hanasaaren voimalaitoksen molempien turbiinien korkeapainepestissä on kahdeksan ja välipainepestissä on 13 jaksoa. Vuosaaren B-voimalaitos on suunniteltu mahdollistamaan pelkän sähkön tuotanto, joten sen höryturbiini koostuu korkea-, väli- ja matalapainepestistä. Vuosaaren B-voimalaitoksen höryturbiini on alkuperäinen vuodelta 1998. Vuosaaren B-voimalaitoksen kp-turbiinissa on 26, vp-turbiinissa 17 ja mp-turbiinissa 5 jaksoa. Salmisaaren ja Vuosaaren B-voimalaitoksissa höyry johdetaan korkeapaineturbiinilta suoraan välipaineturbiinille, mutta Hanasaaren voimalaitoksella höyry tulistetaan turbiinien välillä. Välitulistuksen avulla höyryyn saadaan sidottua enemmän energiaa ja näin hyötysuhdetta pystytään nostamaan.

Kattilassa vesihöyryyn sidottu lämpöenergia muutetaan liike-energiaksi höryturbiinissa. Höryturbiinissa lämpöenergian muuttuminen liike-energiaksi tapahtuu höyryn paisunnan kautta. Höyryn paisumisella tarkoitetaan höyryn tilavuuden kasvua paineen ja lämpötilan laskun seurauksena. Höyryn tilavuuden kasvun seurauksena höyrynopeus kasvaa [8] aiheuttaen juoksusiipiin voiman, joka pyörittää generaattoriin kytkettyä roottoria [9]. Tässä työssä tarkasteltavat turbiinit ovat vastapaineturbiineita. Vastapaineturbiinissa höyryn paisunta määritetään kaukolämmönvaihtimen tai lauhduttimen vastapaineella (tässä kaukolämmönvaihtimien vastapaineella). Mitä pidemmälle höyryn annetaan paisua turbiinissa, sitä viileämpää se on ja sitä suuremmaksi turbiinin rakennusaste kasvaa. Rakennusasteella kuvataan turbiinin tuottaman sähkötehon määrää.

Turbiinin paisuntaa kuvataan ominaisentalpian, H , ja -entropian, S , muutoksella. Entalpien yksikkö on kJ/kg ja entropian kJ/kgK. Ideaalitilanteessa entropian muutokselle pätee $\Delta S=0$ ja turbiinin hyötysuhteelle $\eta=1$. Todellisuudessa höyryn ohivuodot ja läm-

pöhäviöt aiheuttavat, että ΔS on aina suurempi kuin nolla ja näin turbiinin höytysuhde on alle 1. Höyryn paisuntaa turbiinissa voi tarkastella Mollier-diagrammin avulla. Mollier diagrammista käytetään myös nimitystä H,S-piirros. Liitteessä 1 on esitetty Mollier-diagrammi (viitekuva [10]). Diagrammin pystyakselilla on esitetty entalpia ja vaakakselilla entropia. Diagrammissa painekäyrät menevät ylhäältä viistosti alas; paine kasvaa oikealta vasemmalle. Keskellä piirrosta menee raja, jonka yläpuolella höyry on tulistettua ja alapuolella kylläistä. Kylläisen höyryn rajan alapuolella vaakaviivat kertovat höyryn kosteuspitoisuuden ja rajan yläpuolella tulistetun höyryn lämpötilan. Kun turbiinin paisunta esitetään Mollier-diagrammissa, turbiinin tulohöyryn lämpötila ja paine tulee olla tiedossa. Paineen ja lämpötilan avulla diagrammista pystytään määrittämään tulistetun höyryn entalpia. Tutkittaessa vastapaineturbiinia, asetettu vastapaine määrittää, kuinka pitkälle höyry turbiinissa paisuu. Turbiinin tuottama sähköteho on riippuvainen turbiiniin johdetun höyryn massavirrasta ja turbiinissa tapahtuvasta entalpian muutoksesta. Turbiinista saatava teoreettinen maksimiteho määräytyy isentrooppisesta paisunnasta, joka ei ole riippuvainen turbiinista [11]. Isentrooppinen paisunta kuvastaa ideaalitulannetta, mutta todellisuudessa turbiinissa tapahtuvien erilaisten häviöiden seurauksena entalpian muutos on isentrooppista paisuntaa pienempi. Isentrooppisen entalpian määrittämiseksi tulohöyryn lähtöpisteestä vedetään viiva kohtisuoraa alas asetettuun vastapaineeseen asti. Kyseistä pistettä vastaava entalpian muutoksen arvo kerrotaan turbiinin hyötysuhteella ja valitaan diagrammista piste, jossa todellinen entalpian arvo ja vastapainekäyrä kohtaavat. Vedettäessä viiva tulohöyryn pisteestä määritettyyn loppupisteeseen, voidaan arvioida karkeasti höyryn paisuntaa turbiinissa. [8] Materiaalitekniikasta näkökulmasta katsottuna, paisunnan määrittäminen diagrammissa on tärkeää, koska sen avulla pystytään arvioimaan höyrynkosteutta turbiinissa. Kosteuden lisäksi erilaisten materiaaliongelmiin on todettu esiintyvän todennäköisimmin tietyissä Mollier-diagrammin kohdissa [12, s. 287]. Kun voimalaitosta ajetaan pienellä teholla, turbiinin tulohöyryn arvot poikkeavat täyden tehon ajosta. Verrattuna täyden tehon ajoon, tulohöyryn painetta tai lämpötilaa tulee laskea. Tulohöyryn arvojen muuttaminen siirtää turbiinin paisuntakäyrää ja näin muuttaa kohtaa, jossa höyry alkaa kondensoitua. Paisuntakäyrän siirtyminen vaikuttaa myös turbiinin kosteuspitoisuuteen ja materiaaliongelmien esiintymiseen. Höyryturbiinien kosteiden alueiden materiaaliongelmien esittelyä kappaleessa 3.

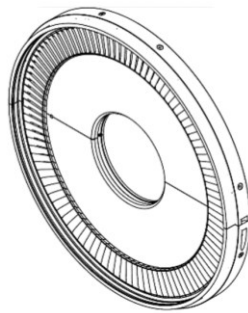
Turbiini voi olla yhteen tai kahteen suuntaan paisuva. Kahteen suuntaan paisuvassa turbiinissa turbiinin tulohöyry jakautuu ja paisuu vastakkaisiin suuntiin. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiini sekä Vuosaaren B-voimalaitoksen väli- ja matalapaineturbiinit ovat kahteen suuntaan paisuvia. Muut Helen Oy:n höyryturbiinit paisuvat yhteen suuntaan.



Kuva 2. Hanasaaren voimalaitoksen T3-höyryturbiinin korkea- ja välipainepesät [13].

Kuvassa 2 on Hanasaaren voimalaitoksen T3:n korkea- ja välipainepesät. Höyryturbiini koostuu pyörivistä roottoriin kiinnitetyistä juoksusiivistä, sekä höyryvirtaa ohjaavista johtosiivistä. Siipien koko ja määrä riippuvat turbiinin läpi kulkevan höyryn paineesta ja massavirrasta [14]. Kuvassa 2 vasemmalla puolella olevan korkeapaineturbiinin siivet ovat huomattavasti pienemmät kuin oikealla olevan välipainepesän siivet. Korkeapainepesässä höyry on tulistettua läpi turbiinin; välipainepesään höyry tulee tulistettuna, mutta poistuu turbiinista kylläisen vesihöyryn ja vesipisaroiden seoksena.

Höyryturbiini jaetaan jaksoihin. Yksi jakso koostuu setistä juoksu- ja johtosiipiä. Siivet on valmistettu usein takomalla. Ne on saatettu kiillottaa tai pinnoittaa parempien pintaominaisuuksien aikaansaamiseksi [15]. Väli- ja matalapaineturbiinien siivet ovat tyypillisesti 12 % kromia sisältävää martensiittista terästä, 17Cr-4Ni erkaumakarkaistua terästä tai titaania [16]. Johtosiivet on kiinnitetty nastoilla tai hitsaamalla johtosiipikiekkoon. Johtosiipikiekkot on valmistettu tyypillisesti valamalla tai koneistamalla.



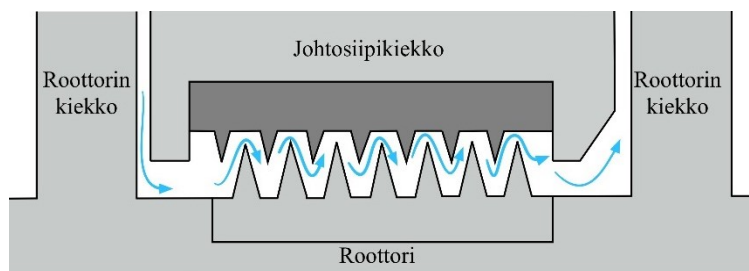
Kuva 3. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin johtosiipikiekko [17].

Kuvassa 3 on esitetty Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin johtosiipikiekko. Kuvan johtosiipikiekko on valmistettu koneistamalla ja siivet on kiinnitetty siihen nastoilla. Johtosiipikiekko on jaettu kahteen osaan turbiinin pesän jakotason kohdalta. Johtosiipikiekkon puolikkaat on kiinnitetty turbiinin ylä- ja alapesiin. Kiekkojen jakotaso saadaan tiiviiksi kiristämällä turbiinin pesän jakotaso tiiviiksi. Johtosiipikiekkojen mate-

riaalit riippuvat höyryn olosuhteista. Johtosiipikiekkojen materiaalit vaihtelevat vähäseosteisista hiiliteräksistä ruostumattomiin teräksiin.

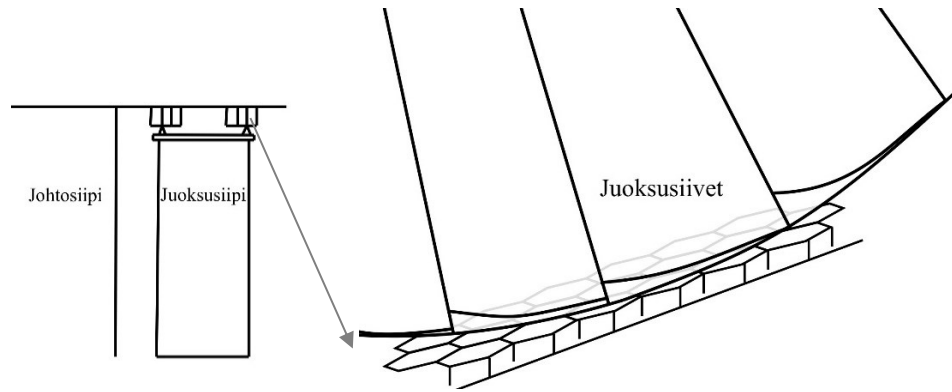
Juoksu- ja johtosiipien suunnitteluun vaikuttaa turbiinin työtap. Höyryturbiinit voidaan jaotella niiden työtavan mukaan aktio- (eli impulssi-) ja reaktioturbiineihin. Aktiokoneessa paisunta tapahtuu turbiinin johtosiivissä, eikä juoksusiipien yli ole paine-eroa [18]. Reaktioturbiineissa paisunta tapahtuu johtosiivissä ja juoksusiivissä [11]. Reaktioturbiineissa johtosiivissä paisunut höyry työntää juoksusiivet pyörimään. Höyry muuttaa suuntaa törmätessään juoksusiiven koveralle pinnalle. Reaktioturbiineissa höyry törmää juoksusiipeen ja kääntää virtauksen suuntaa, samalla höyry paisuu aiheuttaen juoksusiipiin reaktiovoimaan. Reaktiovoima työntää siipeä pyörimään. Turbiinin työtap vaikuttaa turbiinin siipiprofiiliin ja höyryn virtaukseen siivistöissä. Koska eri työtaivoissa paineen muutos tapahtuu eri kohdissa, turbiineissa ilmenevien materiaalivaurioiden sijainti on riippuvainen turbiinin työtavasta. Vuosaaressa höyryturbiinit toimivat reaktioperiaatteella ja Salmisaaren sekä Hanasaaren turbiinit aktioperiaatteella. [8]

Hyvän hyötysuhteen saamiseksi energiahäviöiden määrä on minimoitava. Energiahäviöiden minimoinnissa höyryturbiinin tiiveys on oleellinen tekijä. Turbiinin pesän tulee olla tiivis, mutta myös turbiinin sisäiset ohivuodot tulee pyrkiä estämään. Turbiineihin rakennetaan erilaisia tiivistejärjestelmiä vuotojen estämiseksi. Roottorin tulee päästä pyörimään vapaasti turbiinissa, mutta mahdollisimman lähellä staattisia elementtejä. Tiivistehöyryjärjestelmän on tarkoitus varmistaa, ettei höyry pääse virtaamaan turbiinista sisään tai ulos [11]. Aktiokoneissa johtosiipien ohivuotojen minimointi on olennaista. Reaktiokoneissa myös juoksusiipien tulee olla mahdollisimman tiiviit.



Kuva 4. Roottorin ja johtosiipikiekon välinen labyrinttitiiviste.

Roottorin tulee päästä pyörimään ottamatta kiinni johtosiipikiekkoihin, mutta välistä kulkevan höyryn määrä tulee minimoida. Johtosiipikiekon ja roottorin väliin tyypillisesti rakennetaan labyrinttitiivisteet. Labyrinttitiivisteiden toimintaperiaate on esitetty Kuvassa 4. Tiiviste koostuu roottoria ympäröivistä kaarevista segmenteistä ja johtosiipikiekkoihin asennetuista vastakappaleista. Höyryä pääsee virtaamaan kuvan mukaisesti sokkeloisesta rakenteesta. Labyrinttirakenne estää höyryn suoraviivaisen kulkemisen elementtien välistä.



Kuva 5. Aktioturbiinien juoksusiipien hunajakennotiivisteen periaate.

Koska aktiokoneissa juoksusiipien yli ei ole paine-eroa, juoksusiipien kärkien kohdalle voidaan rakentaa kevytrakenteiset hunajakennotiivistet. Kuvassa 5 on esitetty turbiinin hunajakennotiivistet. Tiiviste on kiinnitetty johtosiipikiekkoon juoksusiipien kärjen kohdalle. Juoksusiipien kärki kulkee lähellä hunajakennotiivisteen pintaa. Tiivisteen tarkoituksena on estää höyryn ohivuodot juoksusiivistä. Hunajakennotiivisteen kevyt rakenne antaa periksi, jos juoksusiivet osuvat tiivisteeseen, eikä tiiviste vahingoita siipien kärkiä. Hunajakennotiivistet eivät toimi reaktiokoneiden juoksusiipien ohivuodon estämiseksi, joten reaktiokoneiden siipien kärkiin rakennetaan pienin välein porrastettu tiivistejärjestelmä. [8] Turbiinin materiaalien tulee kestää olosuhteet, jotta ylimääräisiltä ohivuodoilta voidaan välttyä ja jotta turbiinin muodot pysyvät suunniteltuina, eivätkä muuta höyryvirtausta suunnitellusta.

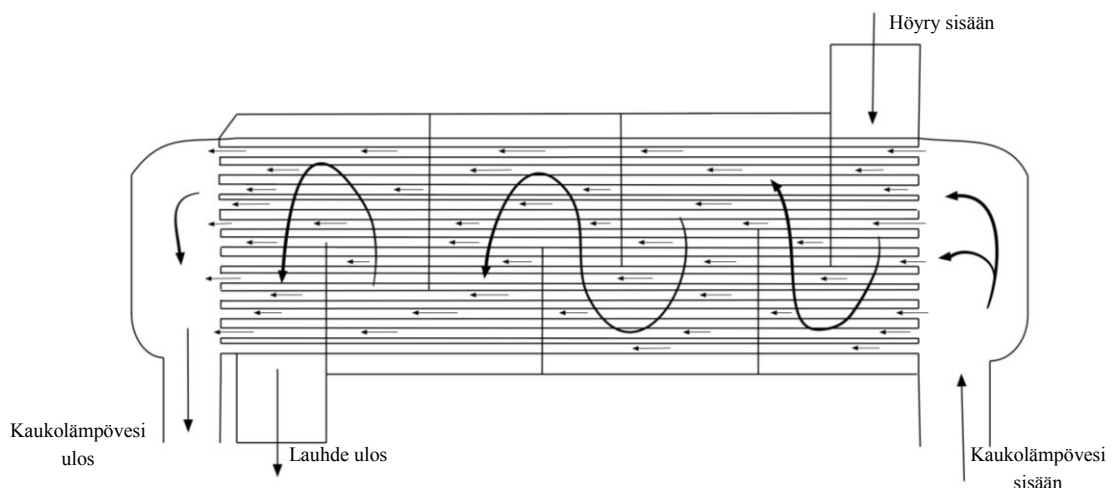
Turbiinien materiaalivalinnat riippuvat höyryn lämpötiloista ja paineista sekä turbiinin kosteuspitoisuudesta. Materiaalien kuntoa voidaan arvioida teoreettisesti tarkastelemalla turbiinin paisuntaa Mollier-diagrammissa. Paisuntakäyrää voidaan verrata todellisiin prosessista mitattuihin arvoihin. Todellisen kosteuspitoisuuden määrittämiseksi turbiiniin tulisi asettaa kosteutta mittaavia antureita. Helen Oy:n turbiineissa ei ole kosteutta mittaavia antureita, joten kosteuspitoisuutta tulee arvioida prosessiarvojen ja turbiinien paisuntakäyrien avulla.

Turbiineille määritetään huoltojen aikaväli. Tyypillisesti turbiinin huoltoväli on 5–10 vuotta. Turbiinin kuntoa voidaan seurata vuosihuoltojen aikana tehtyjen NDT-tarkastusten avulla. NDT-tarkastuksissa keskitytään tarkastamaan turbiinin kunto säröjen, eroosion ja korroosion varalta. Huoltojen välissä turbiineiden kuntoa voidaan tarkkailla tekemällä turbiinille seisokkien aikana endoskooppitarkastuksia. Jos endoskooppitarkastuksessa havaitaan jotain poikkeuksellista, voidaan turbiinin huoltoväliä lyhentää. Ajon aikana turbiinin kuntoa voidaan seurata paineiden ja lämpötilojen lisäksi tarkkailemalla turbiinin värähtelyjä. Värähtelymittausten avulla voidaan päätellä, pyöriikö roottori turbiinissa tasaisesti. Juoksusiipien vaurioituminen tai roottorin epätasapainoisuus voidaan havaita värähtelymittauksista. Myös voimalaitoksen vesikemia antaa tietoa turbiinin kunnosta. Voimalaitoksen lauhdevedestä mitattu hiilidioksidi kertoo prosessin ilmapuodosta [19]. Lauhteen rautapitoisuuden nousu voi kertoa korroosion lisääntyne-

tä määrästä. Voimalaitoksen vesikierrrosta otetut näytteet voivat antaa viitteitä höyryn sisältämistä epäpuhtauksista. Epäpuhtauksien esiintyminen voi antaa syyn turbiinin kunnan tarkempaan tarkasteluun. Koska höyry alkaa kondensoitua kulkiessaan turbiiniprosessin läpi, voimalaitoksen vesikemian ongelmat näkyvät herkimmin turbiinin materiaaliongelmina. Turbiinien kunnan ylläpitämiseksi höyrylle on määritetty tiukat laatuvaatimukset [20]. Höyryn laatuvaatimusten täyttymisen jatkuva seuraaminen parantaa turbiinin eliniän ennustetta. Yhdistämällä NDT-tarkastuksista saatu tieto prosessin aikana kerättyyn dataan, voidaan turbiinin kunnosta luoda kokonaisvaltainen kuva.

2.1.2 Kaukolämmönvaihtimet

Höyryn kuljettua vastapainehöyryturbiinin läpi siihen on varastoitunut vielä suuri määrä lämpöenergiaa. Lämpöenergia voidaan ottaa talteen lauhdeturbiinin avulla sähkönä tai se voidaan siirtää kaukolämpöveden kaukolämmönvaihtimissa. Ottamalla lämpö talteen kaukolämmönvaihtimilla, voimalaitoksen hyötysuhde saadaan korkeammaksi kuin mitä se olisi, jos energia otettaisiin talteen pelkkänä sähkönä. Kaukolämpöä tuottavissa yhteistuotantovoimalaitoksissa, kuten Helen Oy:n voimalaitoksissa, höyryturbiinien välietoista höyry johdetaan kahdelle kaukolämmönvaihtimille. Turbiiniin yhdistettyjen vaihdinten lisäksi laitoksissa on kolmas kaukolämmönvaihdin, niin kutsuttu reduktiolämmönvaihdin tai KLV 3. Reduktiolämmönvaihtimelle höyry ajetaan höyryturbiinin ohi kuumempana kuin KLV 1:een ja 2:een. Reduktiovaihdinta voidaan käyttää yhdessä kahden muun KLV:n kanssa, jos kaukolämpöverkkoon halutaan syöttää kuumempaa vettä kuin mitä KLV 1:llä ja 2:lla pystytään tuottamaan. Reduktiolämmönvaihdinta käytetään yksinään ajotilanteissa, joissa höyryturbiini on jostain syystä pois käytöstä, sekä laitoksen käynnistyksen ja alasajon yhteydessä. [1]



Kuva 6. Vaippaputkilämmönvaihtimen toimintaperiaate.

Helen Oy:n voimalaitoksilla kaukolämmönvaihtimet ovat vaippaputkilämmönvaihtimia. Kuva 6 esittää vaippaputkilämmönvaihtimen toimintaperiaatteen. Putkilämmönvaihdinten putkipaketeissa virtaa kaukolämpövesi ja putkipakettien ympärille johdetaan voima-

laitosprosessin läpi kulkenut höyryturbiinilta tuleva kostea vesihöyry. Höyry kulkee vaipan sisällä putkien ympärillä kaukolämmönvaihtimen läpi luovuttaen lämpöenergiaa putkissa virtaavaan kaukolämpövedeen. Lauhde johdetaan vaihtimesta ulos ja otetaan takaisin prosessin käyttöön. Osa likaisesta lauhdesta voidaan käyttää lauhteen käsitteilyn läpi, jotta prosessiin viety vesi täyttäisi laatuvaatimukset.

Lämmönvaihtimelle tulevan höyryn ja vaihtimesta lähtevän veden lämpötilaerosta käytetään termiä lämmönvaihtimen asteisuus. Lämmönvaihtimen asteisuus kuvaa vaihtimen hyötysuhdetta. Kun kaukolämpöveden lämmittämiseen käytetään kahta lämmönvaihdinta, ensimmäinen vaihdin nostaa kaukolämpöveden lämpötilaa esimerkiksi 20–30 °C ja toinen vaihdin haluttuun menoveden lämpötilaan; eli lämpötilaan, joka poikkeaa vaihtimelle tulevan höyryn lämpötilasta vaihtimen asteisuuden verran. Salmisaassa KLV1 nostaa kaukolämpöveden lämpötilaa 20–30 °C ja Hanasaassa ensimmäiset vaihtimet nostavat lämpötilaa 20–25 °C. [8]

Kaukolämmönvaihdinten putkipaketit saattavat vuotaa, mistä seuraa kaukolämpöveden pääseminen laitoksen vesikiertoon. Kaukolämpövuoto voidaan havaita lauhteen johtokyvyn nousuna [19]. Vaihdinten putkipaketteja tarkastetaan ajoittain mahdollisten vuotojen ja putkien seinien ohenemisen varalta. Puhki menneet putket poistetaan käytöstä tulppaamalla, eli estämällä kaukolämpöveden kierto kyseisissä putkissa.

KLV:t valmistetaan erilaisista teräslaaduista. Eroosion aiheuttamien vuotojen ehkäisemiseksi putkipaketin päälle saatetaan lisätä umpitankoja ottamaan vastaan suurin höyryn aiheuttama voima. Varsinaisen putkipaketin uloimmat putket saatetaan valmistaa ruostumattomasta tai duplex-teräksestä. Pääosa KLV-putkista on usein valmistettu hiili-teräksestä.

2.2 Kaukolämpöverkko

Helen Oy:n voimalaitoksilla tuotetaan kaukolämpöä Helsingin kaukolämpöverkkoon. Kaukolämpöverkko koostuu kahdesta toisiinsa yhdistetystä verkosta, pääverkosta ja itäverkosta. Voimalaitosten tuottaman lämmön lisäksi lämpöä tuotetaan verkkoon eri puolilla Helsinkiä sijaitsevilla lämpökeskuksilla. Lämpökeskuksilla lämpö tuotetaan öljyllä, maakaasulla sekä kaukojäähdytyksen paluuedestä ja jätevedestä kerätyllä hukkalämmöllä [21]. Voimalaitokset sijaitsevat eri puolilla kaukolämpöverkkoa. Kun kaikilla voimalaitoksilla tuotetaan samanaikaisesti kaukolämpöä samalla kaukolämmön menoveden lämpötilalla, kaukolämpöverkko käyttäytyy vakaasti. Muutokset lämmöntuotannossa voivat tehdä kaukolämpöverkon käyttäytymisestä epävakaa. Kaukolämpöverkon toimintaa voidaan tasata ajamalla osa tuotetusta lämmöstä kaukolämpöakkuun. Kaukolämpöakku on suuri vesisäiliö, joka toimii energianvaraajana [1]. Voimalaitosten lämmöntuotannon määrä vaihtelee asiakkaiden kulutuksen mukaan. Tehonvaihtelua voidaan tasata kaukolämpöakkujen käytön avulla. Kaukolämpöakkua voidaan ladata aika-

na, jolloin lämmönkulutus on vähäistä ja siitä voidaan siirtää energiaa kaukolämpöverkkoon kaukolämmön kulutushuippuina. [1]

Asiakkaiden kaukolämmöntarve vaihtelee ulkolämpötilojen mukaan. Talvella kaukolämpövedettä käytetään lämpimän veden lisäksi asuntojen lämmitykseen. Kaukolämpötehon määrää voidaan säätää muuttamalla kaukolämpöveden virtausmäärää tai lämpötilaa. Kaukolämpöveden lämpötila pyritään pitämään tasaisena kaukolämpöverkon epävakauden estämiseksi. Ulkolämpötilan kylmetessä kaukolämmön menoveden lämpötilaa nostetaan. Lämpötilan nostot ja laskut suoritetaan vaiheittain, jotta kaukolämpöverkon lämpöliikkeet ehtivät tasaantua. [22] Helsingissä kaukolämpöveden lämpötila on kesällä noin 85 °C ja talvella lämpötila nostetaan yli 100 °C:seen. Paineastialaki sallii kaukolämpöveden lämpötilan noston 120 °C:seen; jos lämpötila nousee yli 120 °C, laitojen putkiston laatuvaatimukset muuttuvat [23].

Sama asiakkaiden tarvitsema energiamäärä voidaan tuottaa eri menoveden lämpötiloilla muuttamalla kaukolämpöveden virtauksen määrää. Alhaisilla kaukolämpöveden lämpötiloilla suuri kaukolämpöveden virtausmäärä vaatii enemmän pumppausta. Valmet toteutti Helen Oy:lle tutkimuksen [24], jossa tutkittiin kaukolämmön menoveden lämpötilan vaikutuksia Helsingin kaukolämpöverkon lämpöhäviöihin. Tutkimuksessa todettiin, että kaukolämmön menoveden lämpötilaa optimoimalla voidaan saada suuria säästöjä lämpöhäviöiden minimoituessa. Vaikka pumppauskustannukset kasvavat virtausmäärän kasvun seurauksena, lämpötilan optimoinnilla voidaan saada merkittäviä säästöjä. Myös vastapaineturbiinien rakennusasteen oletetaan nousevan, kun kaukolämmön menoveden lämpötila laskee. Kaukolämmön menoveden optimoinnilla tarkoitetaan menoveden lämpötilan mahdollisemman kustannustehokkaan arvon löytäminen. Valmetin tutkimuksessa [24] todettiin, että lämpöhäviöiden minimointi laskemalla kaukolämpöveden lämpötila mahdollisimman alas, tuottaa kustannustehokkaimman ratkaisun.

Koska talvisin lämmönkulutus on suurta, kaukolämmön menoveden lämpötilan tulee talvisin olla korkeampi; näin ollen kaukolämmön menoveden optimointi vaikuttaisi vain kesäajan kaukolämpöveden lämpötilaan. Energiategollisuus ry on ohjeistanut alimmaksi sallituksi ensiöpiirin tulolämpötilaksi 70 °C [24]. Helsingin kaukolämpöverkon laajuus rajoittaa alinta mahdollista lämpötilaa. Valmetin tutkimus osoitti, että lämpötilaa voidaan laskea nykyisestä 85 °C minimistä useita asteita ilman, että lämmönriittävyys olisi ongelma. Menoveden lämpötilaa optimoitaessa on otettava huomioon, että kuluttajille luvattun kaukolämpöveden lämpötilan (65 °C [25]) tulee täyttyä myös kaukolämpöverkon uloimmissa päissä. Käytännössä ongelmia lämmön riittämisestä verkon uloimmille laidoille ei tule, jos verkon molemmilla laidoilla olevat Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitokset tuottavat lämpöä kaukolämpöverkkoon. Jos Salmisaaren tai Hanasaaren voimalaitosten tulee tuottaa lämpö myös itäisen verkon viimeisiin haaroihin, tulee lämpötilan riittävyys huomioida erityisen tarkasti. Valmetin tekemän tutkimuksen perusteella käytännössä alin mahdollinen menoveden lämpötila Helsingin kaukolämpöverkolle on 75 °C [24].

Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa päädytään laskemaan nykyisestä 85 °C:n minimistä alemmas, tulee ottaa huomioon Helen Oy:n laitteiden asettamat rajoitteet. Salmisaassa sijaitsevan absorptiojäähdyttimen vuoksi menoveden lämpötila ei saisi laskea alle 85 °C:n [26]. Absorptiojäähdyttimen vaatima lämmöntarve voidaan kuitenkin kiertää esimerkiksi tuottamalla jäähdyttimelle lämpö erikseen. Kaukolämmön menoveden lämpötilan laskusta seuraava lämpöhäviöiden minimointi tuottaa huomattavat säästöt, vaikka absorptiokoneelle päätettäisiin tuottaa lämpö erikseen [24].

Asiakkaiden lämmönkulutuksen määrä vaikuttaa kaukolämmön paluuveden lämpötilaan. Menoveden optimointia suurempi vaikutus paluuveden lämpötilaan oletetaan olevan asiakkaiden käytön määrällä. Paluuveden lämpötila aaltoilee vuorokausirytmien mukaan. Pitkää aikaväliä seurattaessa paluuveden lämpötilassa on mahdollista huomata optimoinnista seuraavia eroja. Menoveden lämpötilan oletetaan vaikuttavan paluuveden lämpötilaan.

2.3 Kaukolämpöveden lämpötilan ja voimalaitoskomponenttien yhteys

Tämän diplomityön tavoitteena on löytää mahdolliset voimalaitoskomponenttien materiaalien asettamat rajoitteet kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamiselle. Tässä kappaleessa on selitetty kaukolämpöveden lämpötilan ja voimalaitoskomponenttien välistä yhteyttä.

Merkittävä vaikutus kaukolämpöveden lämpötilalla on laitteisiin, jotka ovat voimalaitosprosessin ja kaukolämpöveden risteyskohdassa. Tällaisia laitteita ovat kaukolämmönvaihtimet ja vastapainehöyryturbiinit. Kaukolämpöveden lämpötila säädetään muuttamalla kaukolämmönvaihtimen vastapainetta. Kaukolämmönvaihtimen vastapaine määrittää, kuinka pitkälle höyry turbiinissa paisuu. Pidemmälle paisunut höyry on viileämpää ja lämmittää kuumempaa höyryä vähemmän kaukolämpövedettä. Pidemmälle paisuessaan höyry tuottaa enemmän sähkötehoa. Sähkötehon määrän nousua alentaa kuitenkin kosteuden nousu turbiinissa. Paisuessaan pidemmälle höyryn tilavuus ja nopeus kasvavat. Suuremmat höyrymäärät lisäävät väliottojen ja putkistojen kuormitusta. Kaukolämpövesien lämpötilan laskiessa erittäin pieneksi höyryn tilavuus saattaa kasvaa niin suureksi, että putkistojen ja väliottojen tilavuus alkaa rajoittaa höyryn kulkua [8].

Korkeammilla kaukolämmön paluuveden lämpötiloilla ensimmäisen kaukolämmönvaihtimen vastapaine on korkeampi kuin matalilla paluuveden lämpötiloilla. Teoreettisesti laskettuna turbiinin Vo0:n vastapaine voidaan arvioida kaukolämmön paluuveden lämpötilasta. Arviossa käytetään oletusta, että KLV1 nostaa kaukolämpöveden lämpötilaa vakiomäärän. Arvioitaessa turbiinin paisuntaa erilaisilla kaukolämpöveden lämpötiloilla voidaan käyttää KLV1:n vastapaineen arvona vaihtimen lämpötilannoston minimiä teoreettisen tarkastelun lähtökohtana. Lämpötilannoston minimiarvoa vastaa pienin mahdollinen vastapaine. Minimiarvojen tarkastelulla saadaan arvio vastapaineturbiineil-

le pahimmasta mahdollisesta tilanteesta. Pienillä vastapaineilla höyry on viileämpää, kosteampaa ja enemmän materiaaleja kuluttavaa.

Jos kaukolämmönvaihtimille johdettava höyry tulee kahteen suuntaan paisuvalta turbiinilta, kaukolämmön menoveden lämpötila vaikuttaa pääasiassa turbiinin kuumempaan päähän (Vo1) ja paluuveden lämpötila viileämmäksi paisuvaan päähän (Vo0). Koska viileä pää on kuumaa päätä kosteampana, suurimmat kosteudet turbiinissa oletetaan saavutettavan viileässä päässä kaukolämmön paluuveden ollessa viileintä. Kaukolämmön menoveden lämpötila puolestaan vaikuttaa turbiinin kuumemman pään paisuntaan.

Höyryn paisunta ja kosteuspitoisuus vaikuttavat myös voimalaitoksen putkistoon. Kaksifaasinen virtaus kuluttaa putkia enemmän kuin kuiva vesihöyry. Myös virtausmäärän kasvaminen kuormittaa putkistoja pieniä virtausmääriä enemmän. Kaukolämmön menon ja paluuveden lämpötilojen eron ollessa suuri, virtausmäärä ja virtausnopeus pienenevät, minkä seurauksena virtausvastus ja pumppauksen tarve pienenee [1].

Voimalaitosprosessin sujuva toimiminen alhaisilla kaukolämmön menoveden saattaisi vaatia muutoksia ja investointeja prosessiin. Kaukolämmönvaihdinten paine-erojen muutokset voivat vaikuttaa vaihdinten toimintaan ja rajoittaa lämpötilan laskua. Tässä diplomityössä ei oteta kantaa mahdollisiin investointeihin vaan keskitytään tutkimaan höyryn paisunnan muutoksen vaikutusta voimalaitoskomponenttien materiaaleihin.

3. VASTAPAINETURBIINIEN MATERIAALIONGELMAT

Höyryturbiinien materiaaliongelmat riippuvat höyrynlämpötilasta, paineesta ja kosteuspitoisuudesta. Tulistetun höyryn alueella materiaaliongelmat ovat tyypillisesti kuuman lämpötilan aiheuttamaa korroosiota, virumista ja väsymistä. Turbiinin pinnoille saattaa muodostua myös kerrostumia. Kerrostumat sijaitsevat tyypillisesti Mollier-diagrammin tulistetun höyryn alueilla juuri ennen höyryn kondensoitumisen rajaa. Alue on merkattu liitteen 2 diagrammiin vaalean keltaisella. Kyseillä alueella monet suolat alkavat saostua höyrystä. Höyryn paisuessa turbiinissa paine ja lämpötila laskevat. Höyry alkaa kondensoitua, kun lämpötila laskee riittävästi. Lämpötilan laskiessa kondensoituneet vesipisarat aiheuttavat ongelmia turbiinin materiaaleille. Kosteaa höyryä alueella esiintyy erilaisilla mekanismeilla ilmeneviä korroosion ja eroosion muotoja. Ongelmien on todettu sijoittuvan pääsääntöisesti tietyille alueille Mollier-diagrammissa. Merkittävimpiä turbiinien vaurioitumiseen liittyviä materiaaliongelmiä ovat faasimuutosalueen korrosio, eroosiokorroosio ja vesipisaraeroosio. Vastaavia ongelmia esiintyy myös kaukolämmönvaihtimissa. Tässä luvussa on esitetty vastapaineturbiineissa ilmenevät materiaaliongelmat. Osa ongelmista on suoraan riippuvaisia kosteuden noususta prosessissa; osaan kosteuden nousu vaikuttaa välillisesti.

Voimalaitosten höyryprosessin materiaalit ovat pääsääntöisesti erilaisia teräslaatuja. Kuumimmissa ja eniten kuormituksen alla olevissa kohteissa käytetään ruostumatonta, haponkestävää tai muuta runsasseosteista terästä, mutta monessa kohteessa käytetään vähäseosteisia hiiliteräslaatuja. Hiiliteräkset ovat runsaasti seostettuja teräksiä halvempia ja helpompia käsitellä, joten niitä käytetään olosuhteiden salliessa.

Höyryturbiineissa ilmenevän korroosion syyn tarkempi analysointi vaatii tarkkaa tietoa paikallisista lämpötiloista, paineista, virtausnopeuksista, vesikemiasta sekä materiaaleista ja niiden jännitystiloista [9]. Väli- ja matalapaineturbiineissa korroosiolle riskialteimmat elementit sijaitsevat turbiinin faasimuutosalueella. Faasimuutosalueella tulistettu höyry kondensoituu vesihöyryksi. Ensimmäisten kondensoituneiden pisaroiden pH on alhaisempi kuin prosessihöyryn pH. Prosessihöyryn pH pyritään säätämään noin arvoon 9; ensimmäisten kondensoituvien pisaroiden pH saattaa laskea arvoon 5, ensimmäisenä nestemäiseen faasiin kondensoituvien suolojen ja helposti haihtuvien yhdisteiden höyryfaasiin jäämisen seurauksena. [27] Voimalaitoksen syöttöveden pH:n säätöön voidaan käyttää ammoniakkia. Helen Oy:n kaikilla voimalaitoksilla prosessihöyryn pH:n säätö tehdään ammoniakilla [19]. Ammoniakki on herkästi haihtuvaa, joten se alkaa kondensoitua höyryyn vasta höyrynkosteuden noustessa tarpeeksi suureksi. Näin ol-

len höyryn pH pysyy alhaisena faasimuutosalueen läpi. Faasimuutosalue alkaa ensimmäisten pisaroiden kondensoituessa ja jatkuu noin 5 % höyrynkosteuteen asti. Alhaisen höyryn pH:n seurauksena faasimuutosalue on vahingollinen höyryturbiinin materiaaleille [27]. Faasimuutosalue on merkitty vihreänä Liitteen 2 Mollier-diagrammiin. Faasimuutosalueen sijainti on riippuvainen turbiinin ajotavasta. Ajotavan vaihtelun seurauksena faasimuutosalueen korroosio-ongelmat saattavat jakaantua laajalle alueelle. Roottorin kiekkojen halkeamista on tutkimuksissa ilmennyt paikoissa, joissa kosteuspiitoisuus on korkeintaan 6 % [28]. Tällä alueella ilmenee myös suurin osa turbiinien siipivaurioista. Faasimuutosalueella kosteus voi kondensoitua ja höyrystyä useita kertoja, mikä kuormittaa turbiinin materiaaleja. Kosteassa höyryssä olevien epäpuhtauksien suhteellinen osuus kasvaa kosteuden höyrystyessä turbiinin pinnoilla, mikä voi johtaa korroosioon. Kostean höyryn epäpuhtaudet lisäävät jännityskorroosiosta johtuvan säröilyn riskiä erityisesti faasimuutosalueella. Epäpuhtaudet voivat ilmetä kuivina suoloina tai vesiliuoksena riippuen höyrynpaineista kylläisen rajan lähellä. [9]

Prosessin aikaiset äkilliset muutokset lisäävät korroosion mahdollisuutta erityisesti, jos turbiiniin kohdistuu jännityksiä. Jokainen ylös- ja alasajotilanne aiheuttaa turbiinin siipiin ja roottoriin korkeita jännityksiä. Aiheutuneet jännitykset voivat johtaa jännityskorroosioon, joka ilmenee usein säröilynä. Useat ylös- ja alasajot kuormittavat turbiinia aiheuttaen myös materiaalien väsymistä. Väsymisen lisäksi epätasaiset virtaukset ja erityisesti ylösajoissa syntyvät sokkiaallot rasittavat materiaaleja. [9] Epätasainen ajo turbiinissa aiheuttaa turbiinin siipiin värähtelyä, jonka seurauksena siipiin kohdistuu väsymistä aiheuttavaa dynaamista jännitystä [29].

Korroosion määrä on vahvasti sidoksissa veteen liuenneiden aineiden määrään ja näin ollen voimalaitoksen vedenkäsittelyllä on merkittävä vaikutus korroosion esiintymiseen höyryturbiineissa ja kaukolämmönvaihtimissa. Merkittävimpiä epäpuhtauksia ovat happi, kloridit, sulfaatit, fluoridit, karbonaatit, erilaiset hapot, hydroksidit ja hiilidioksidi. Veteen liuenneet kloridit voivat aiheuttaa pistekorroosiota. On huomioitavaa, että myös puhdas vesi ja kostea höyry voivat aiheuttaa jännityskorroosiosta johtuvaa säröilyä ja korroosioväsymistä turbiinin siivissä ja kiekkoissa. [9] Vedenkäsittelyn lisäksi seisokkien aikainen laitteiden säilöntä vaikuttaa korroosion määrään. Reagointi ilman kanssa voi tuhota muodostuneen suojaavan oksidikalvon laitteiden sisäpinnoilla, mistä saattaa seurata metallin pistekorroosiota [30]. Asianmukainen laitteiden kuivaaminen tai kostean hapettoman ympäristön mahdollistaminen pienentävät huomattavasti seisokin aikaisen korroosion riskiä.

Materiaalien faasimuutosalueenkestoa voidaan parantaa lisäämällä materiaalin korroosionkestoa ja säröjen etenemistä hidastavia ominaisuuksia. Terästen korroosionkestoa voidaan parantaa seostamalla teräkseen kromia. Teräkseen seostettu kromi muodostaa hapettuessaan rautaoksidien muodostamaa oksidikalvoa tiiviimmän oksidikalvon teräksen pinnalle [12, s.146], mikä hillitsee teräksen hapettumisreaktioita ja vähentää teräksen syöpymistä happamissa olosuhteissa. Myös pienet määrät fosforia parantavat teräs-

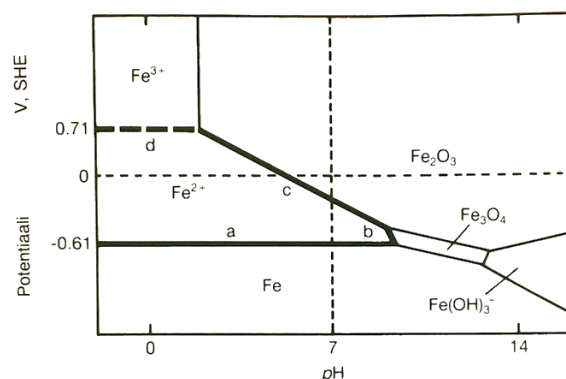
ten korroosionkesto. [31] Jännitykselle alttiiden komponenttien tulee olla valmistettu materiaalista, joka vastustaa särön syntymistä ja muodostuneen särön etenemistä. Faasimuutosalueella jännityksen aiheuttamien säröjen etenemistä voidaan hidastaa seostamalla teräkseen mangaania. Metallit, joilla on korkea myötöraja, ovat herkkiä jännityskorroosiolle [32].

Faasimuutosalueen korroosion lisäksi vastapaineturbiineissa esiintyy tässä työssä tutkituja eroosiokorroosiota ja vesipisaraeroosiota.

3.1 Eroosiokorroosio ja virtauksen kiihdyttämä korroosio

Eroosio ja korroosio voivat toimia toisiaan kiihdyttävinä tekijöinä eroosiokorroosion muodossa. Eroosiokorroosiota voi ilmetä olosuhteissa, joissa yksinään eroosio tai korroosio eivät aiheuttaisi materiaalin kulumista tai kulumisen olisi vähäistä. Eroosiokorroosiota esiintyy tyypillisesti kostean höyryn putkistoissa sekä väli- ja matalapaineturbiineiden, joihin tulevaa höyryä ei välitulisteta, pesissä [12, s. 286]. Eroosiokorroosion aiheuttajana voi toimia virtaava kaasu tai neste [33]. Virtaavan nesteen koostumuksella on merkittävä vaikutus eroosiokorroosion nopeuteen. Eroosiokorroosiossa materiaali kuluu nesteeseen liuenneiden ionien tai yhdisteiden aiheuttamien reaktioiden seurauksena [34]. Eroosiokorroosion lisäksi virtaava höyry aiheuttaa virtauksen kiihdyttämää korroosiota, FAC:ia (flow accelerated corrosion) [35]. Kulumisen on erityisen voimakasta, jos virtauksessa on mukana kiinteää ainesta. Eroosiokorroosio tai FAC ilmenee tyypillisesti metallin pinnalle muodostuneina urina, pyöreinä reikinä, aaltomaisina jälkinä tai hevosenkengän muotoisina urina.

Metallien eroosiokorroosionkesto on riippuvainen pinnalle syntyvästä oksidikalvosta, raudan tapauksessa magnetiitista. Höyrynvirtaus, kiinteät partikkelit ja höyryn epäpuhtaudet voivat rikkoa metallin pintaan syntyneen kalvon ja tehdä metallista alttiin korroosiolle [36]. Metallin pinnalle syntynyt oksidikalvo voi myös liueta pois.

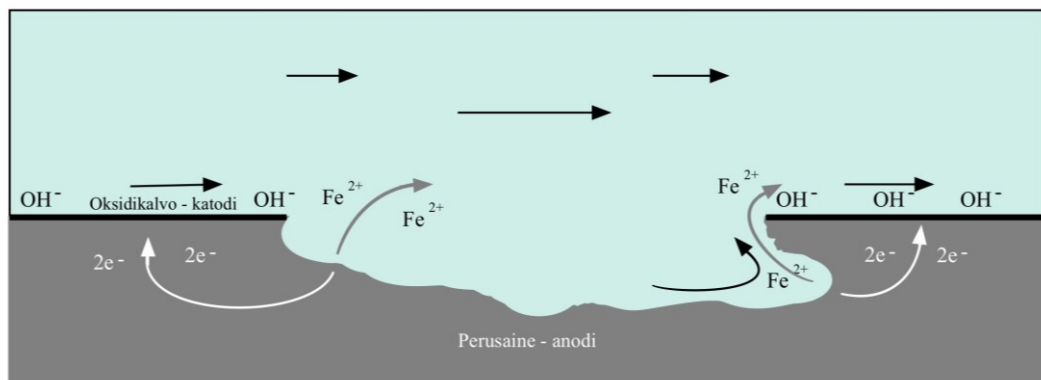


Kuva 7. Raudan Pourbaix-diagrammi 25 °C:ssa [12, s. 49].

Suotuisissa olosuhteissa teräksen pinnalle syntyy ohut ja tiivis magnetiittikalvo. Magnetiittikalvo suojaa pohjametallia korroosiolta. Puhtaan raudan potentiaali-pH -piirros,

eli nk. Pourbaix-diagrammi on esitetty Kuvassa 7. Rauta (Fe) on immuuni alhaisilla potentiaaleilla. Raudan magnetiitin (Fe_3O_4) syntyminen tapahtuu vain kapealla emäksisellä pH-välillä. Lämpötilan ollessa $25\text{ }^\circ\text{C}$ rauta passivoituu myös hematiittina (Fe_2O_3). Muilla alueilla (Fe^{2+} , Fe^{3+} ja $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$) ilmenee raudan korroosiota. Teräksen seosaineet vaikuttavat teoreettisen Pourbaix-diagrammin passivaatioalueisiin. Esimerkiksi teräkseen seostettu kromi teoriassa muuttaa raudan Pourbaix-diagrammia puhtaan kromin Pourbaix-diagrammin suuntaan laajentaen teräksen passivoitumisaluetta. Käytännön mitauksissa kromin vaikutus teräksen passivoitumiseen voidaan havaita teräksen polarisaatiokäyristä: Kromin seostaminen alentaa teräksen passivoitumispotentiaalia ja virrantiheyttä, mikä tarkoittaa teräksen korroosion määrän vähenemistä. Teräksen passivoitumisen huomioiminen on olennaista analysoidessa höyryturbiinien materiaalien kestoa ja voimalaitoksen vesikemialla. [12, s. 49–61 ja s. 94]

Eroosiokorroosiossa virtaus kiihdyttää korroosioreaktioita poistamalla metallin pinnalta metalli-ioneja tai muodostuneen oksidikalvon, jolla muuten olisi metallia suojaava vaikutus. Kuva 8 esittää matalaseosteisen teräksen eroosiokorroosioreaktion. Kuvassa paljastunut pinta toimii anodina ja pinnan oksidikalvo katodina; muodostunut sähkökemiallinen pari kiihdyttää anodin syöpymistä. [25]

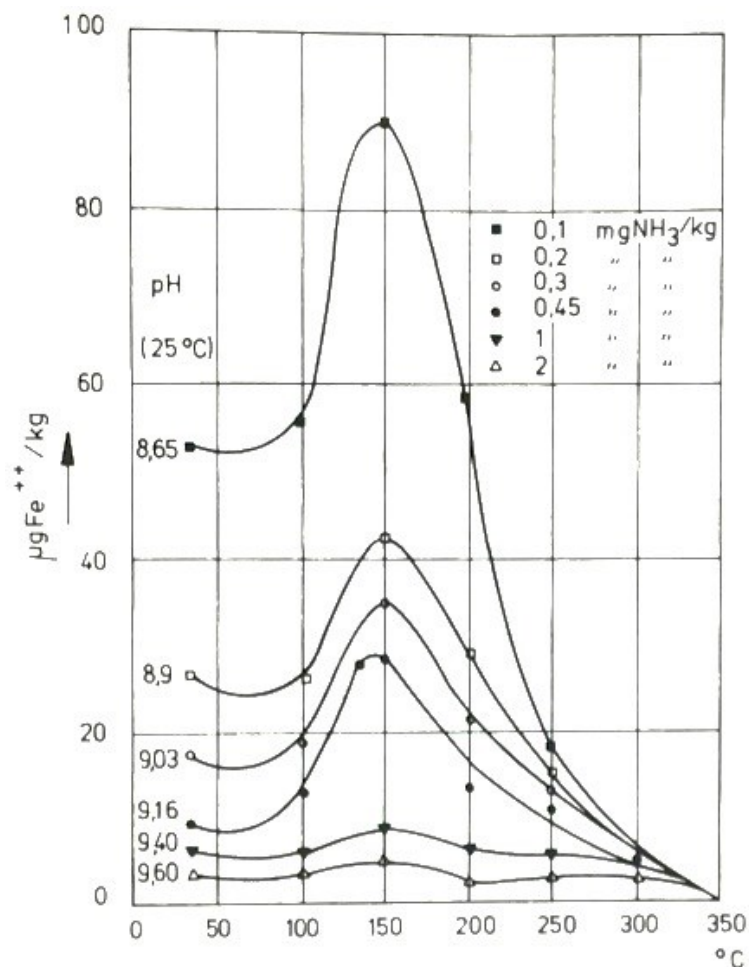


Kuva 8. Matalaseosteisen teräksen eroosiokorroosio.

Kuvan 8 esittelemä eroosiokorroosion muoto on tyypillinen kostean höyryn alueen turbiinien pesille ja kaukolämmönvaihtimille. Turbiinien ja kaukolämmönvaihtinten eroosiokorroosio ei aina esiinny magnetiitin liukenemisena. Eroosiokorroosion määritelmä vaihtelee lähteistä riippuen. Kuten aiemmin mainittu, eroosiokorroosion lisäksi höyryprosessissa ilmenee FAC:ia. Ilmiönä eroosiokorroosio ja FAC rinnastetaan usein toisiinsa, koska molemmat perustuvat eroosion ja korroosion yhteisvaikutukseen. FAC esiintyy tyypillisesti nopeassa yksifaasivirtauksessa [37]. Virtaus ei välttämättä irrota metallia, mutta virtauksessa esiintyvien pyörteiden seurauksena korroosioreaktioiden määrä kasvaa paikallisesti [38]. Eroosiokorroosiota ja FAC:a on toisinaan mahdoton erottaa toisistaan [38]. Joissain lähteissä FAC ja eroosiokorroosio kuvataan samana ilmiönä [39]; esimerkiksi Banerjee ym. kuvaavat eroosiokorroosiota FAC:na kaksifaasivirtauksessa [40]. Hesketh ja Walker puolestaan kuvaavat FAC:ia kosteiden höyrytur-

biinien ongelmana, jossa kaksifaasivirtaus kuluttaa turbiinin pesän materiaalia [41]. Kaksifaasivirtauksessa eroosion vaikutus on yksifaasivirtausta suurempi, joten myös materiaalin spesifinen kuluminen on voimakkaampaa [40]. Käytännön tutkimuksissa eroosiokorroosion ja kaksifaasisen FAC:n erottaminen toisistaan saattaa olla mahdotonta. Eroosiokorroosion ja FAC:n muodostumiseen vaikuttavat samat tekijät, joten vaurioiden estäminen materiaalivalinnoilla ei vaadi ilmiöiden erottamista toisistaan.

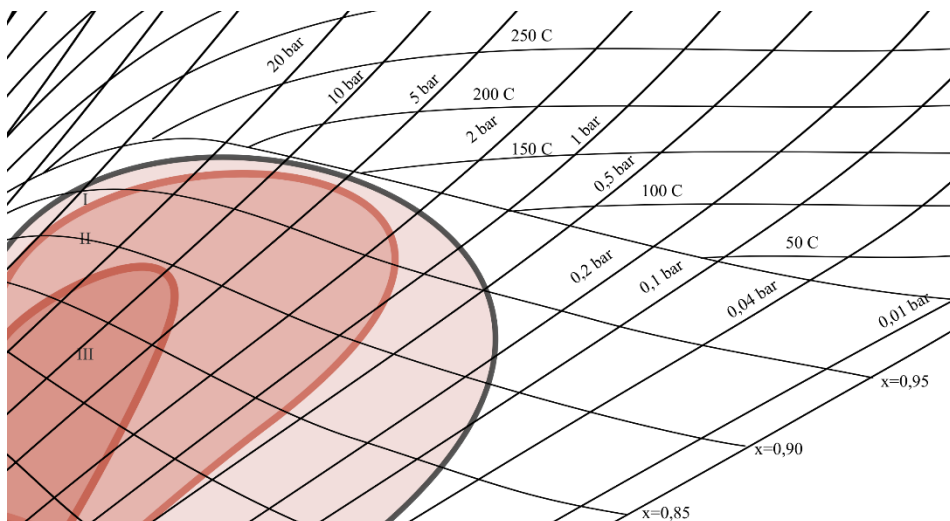
Erilaiset poikkeavuudet tasaisella pinnalla toimivat pisteinä, joihin eroosiokorroosio keskittyy [33]. Eroosiokorroosion estämiseksi komponenttien muodot tulee suunnitella niin, että pyörteitä aiheuttavien muotojen määrä on mahdollisimman vähäinen. Esimerkiksi putkistojen mutkat [42, s. 292] ja höyryturbiinien jyrkät kulmat ovat riskialttiita eroosiokorroosiolle.



Kuva 9. Magnetiitin liukoisuus eri pH-arvoilla [12, s. 288].

Oksidikalvon liukeneminen on riippuvainen höyrykoostumuksesta ja lämpötilasta. Höyryn lämpötilan ollessa 100–200 °C, raudan oksidikalvo on erittäin herkästi liukenevaa ja eroosiokorroosion riski suurin. Magnetiitin liukoisuus eri pH-arvoilla on esitetty Kuvassa 9. Eroosiokorroosion riski on suurin noin 150 °C:ssa, kun pH on alle 8 ja kun prosessissa on pieni happipitoisuus [43]. Kuvassa 7 esitetty raudan Pourbaix-

diagrammi osoittaa, että raudan passivoituminen tapahtuu korkeilla pH-arvoilla. Kun pH-arvo nousee yli 9,2, rauta passivoituu ja eroosiokorroosion voimakkuus laskee dramaattisesti lähelle nollaa [12, s. 289]. Kaksifaasisessa virtauksessa pisaroiden pH on tyypillisesti alhaisempi kuin höyryn pH [44], joten prosessihöyryn pH voi poiketa merkittävästi kostean höyryn pisaroiden pH:sta.



Kuva 10. Eroosiokorroosion ilmeneminen Mollier-diagrammin alueilla. I) Lievä eroosiokorroosio, II) vakava eroosiokorroosio, III) erittäin vakava eroosiokorroosio [12, s. 287; 45].

Korroosiokäsikirjassa [12, s. 287] ja Povarov ym. julkaisemassa artikkelissa [45] on määritetty riskialueet eroosiokorroosiolle Mollier-diagrammissa. Alueet poikkeavat toisistaan, mutta sijoittuvat samaan kohtaan diagrammissa. Kuva 10 esittää näiden lähteiden perusteella luodun eroosiokorroosion riskialueen Mollier-diagrammissa. Kun kylmän höyryn paine on 5 bar, höyryn lämpötila on noin 150 °C [46] ja eroosiokorroosio on voimakkainta. Kuvaan 10 merkitty vakavan eroosiokorroosion alue sijoittuu lämpötilavälille 80–265 °C [46]. Erittäin vakavaa eroosiokorroosiota esiintyy alueilla, joissa lämpötila on lähellä 150 °C:a ja kosteuspitoisuus on suuri (yli 10 %).

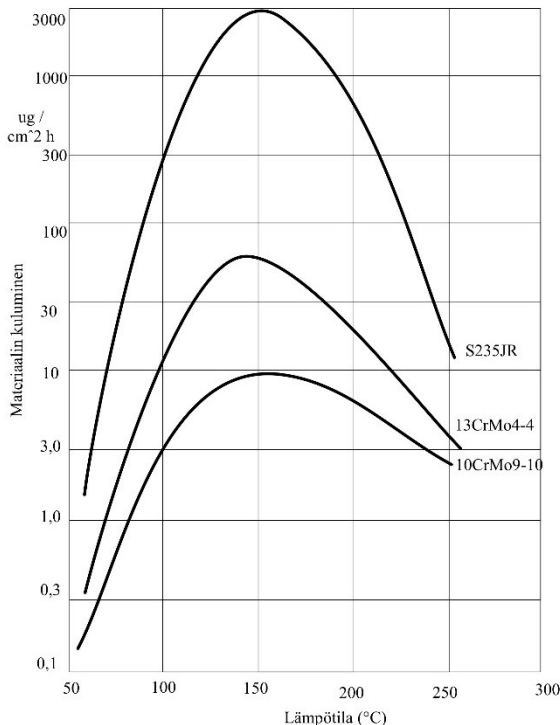
Höyryn sisältämät korroosiota kiihdyttävät yhdisteet, kuten kloridit, sulfaatit, hydroksidit, silikaatti ja karbonaatit lisäävät eroosiokorroosion riskiä. Turbiinin pinnoilla esiintyessään ne ovat vallitseva syy höyryturbiineissa esiintyvään korroosioon ja eroosiokorroosioon. [47]

Kun prosessissa on happea runsaasti, terästen pinnalle muodostuu suojaava oksidikalvo nopeammin kuin eroosiokorroosio sitä kuluttaa [12, s. 289]. Metallit, joiden pinnalle muodostuu paksu suojaava oksidikalvo, ovat usein alttiimpia eroosiokorroosiolle kuin metallit, jotka muodostavat ohuen kalvon. Tämä johtuu paksun oksidikalvon verrattain huonosta adheesiosta.

Kostean höyryn aiheuttamaa korroosion kiihdyttämää eroosiota on ilmennyt myös roottorin kiekkoissa johtosiipikiekkojen roottorin puoleisten labyrinttiivisteiden kohdalla. Kyseinen eroosio johtuu johtosiipikiekkojen ja roottorin välisten tiivisteiden vuodosta. Labyrinttiivisteisiin kertyy kosteutta, joka purkautuu roottorin kiekkoon aiheuttaen eroosiota. [48]

Myös vesipisaroiden iskeytyminen voi aiheuttaa eroosiokorroosiota [49]. Höyryn kosteuspitoisuus lisää eroosiokorroosion riskiä kaksifaasisen virtauksen FAC:in muodossa [36]. Kaksifaasivirtauksen FAC:ia voi esiintyä myös alueilla, jotka eivät sijaitse Mollier-diagrammiin merkityllä eroosiokorroosion alueella. Virtauksen ollessa voimakasta ja höyryn kosteuspitoisuuden korkea, pisaroiden pyörteilevä liike voi aiheuttaa FAC:ia. Kaksifaasivirtauksen FAC:ssa yhdistyy eroosiokorroosio ja vesipisaraeroosio.

Seostetuilla teräksillä on huomattavasti parempi eroosiokorroosion kesto kuin hiiliteräksillä. Erityisesti teräkseen seostettu kromi vähentää eroosiokorroosion määrää. Seostamalla kromia teräksen vastustuskyky eroosiokorroosiota vastaan kasvaa lineaarisesti [12, s. 290]. Teräkseen seostettu kromi hapettuu yhdessä raudan kanssa muodostaen teräksen pinnalle tiiviimmän ja suojaavamman oksidikalvon, jolla on parempi adheesio, kuin pelkän raudan muodostamalla oksidikalvolla. Jos kromia on teräksessä yli 12 %, eroosiokorroosion määrä staattisissa elementeissä on erittäin vähäinen. [32] Ruostumattomat teräkset ja titaani ovat lähes immuuneja eroosiokorroosiolle [34].



Kuva 11. Kolmen eri voimalaitoksilla käytetyn teräslaadun eroosiokorroosion aiheuttaman materiaalin kulumisen riippuvuus lämpötilasta [12, s. 288].

Kuva 11 esittää kolmen eri hiiliteräsalaadun eroosiokorroosionkeston eri höyryn lämpötiloilla. Taulukossa 1 on esitelty vastaavien teräsalaatujen standardien mukaiset koostumukset. Lämpötilassa 150 °C, teräsalaadun 10CrMo9-10 spesifinen kuluminen on 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$, mutta vähemmän seostetun alaadun S235JR vastaava kulumisnopeus on 3000 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$.

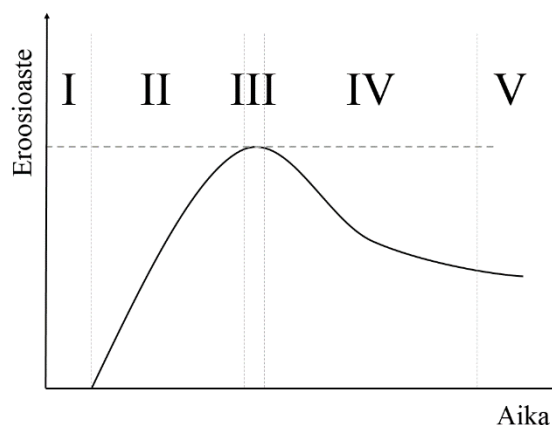
Taulukko 1. Kuvan 11 teräsalaatujen koostumuksia [50].

Teräsalaatu	C	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Si	Al	Cu	Ni
S235JR, 1.0036	<0,17	<1,40	<0,045	<0,045	<0,007	-	-	-	-	-	-
13CrMo4-4, 1.7335	0,10– 0,17	0,40– 0,70	<0,025	<0,020	<0,012	0,70– 1,15	0,40– 0,60	<0,35	<0,04	<0,30	<0,30
10CrMo9-10, 1.7980	0,08– 0,14	0,40– 0,80	<0,020	<0,010	<0,012	2,00– 2,50	0,90– 1,10	<0,50	-	<0,30	-

Kuvan 11 perusteella kromin lisääminen teräkseen nostaa teräksen eroosiokorroosionkestoja. Ruostumattoman teräksen käyttö minimoi eroosiokorroosion määrän lähes olemattomaksi [32].

3.2 Vesipisaraeroosio

Höyryturbiineissa eroosio kohdistuu tyypillisesti juoksusiipiin tai johtosiipiin [49]. Eroosion aiheuttaja turbiinin alkupäässä on yleensä aiemmasta prosessin vaiheesta irronnut oksidikalvo (magnetiitti tulistimilta); kun taas turbiinin loppupäässä eroosio johtuu vesipisaroiden iskuista [49]. Vesipisaraeroosio on tyypillistä turbiineissa, joiden paisunta sijoittuu kostean höyryn alueelle [30]. Vesipisaroiden aiheuttama eroosio on ongelma erityisesti pyörivissä juoksusiivissä, sillä vesipisara iskeytyy erityisen voimakkaasti ääntä nopeammin liikkuviin siipien kärkeen [51]. Turbiinin siipien pituutta voidaan kasvattaa lisätehon saamiseksi; tällöin kuitenkin siiven kärjen nopeus kasvaa ja kärki tulee aiempaa alttiimmaksi vesipisaraeroosiolle [15]. Vesipisaraeroosiota esiintyy myös turbiinien staattisissa komponenteissa. Staattisten komponenttien kohdalla ilmevä vesipisaraeroosio yhdistetään aiemmin esiteltyyn kaksifaasivirtauksen FAC-ilmiöön [41].



Kuva 12. Eroosioasteen muutos vakio-olosuhteissa ajan suhteen.

Vesipisaraeroosioasteen käyrä standardoidun (ASTM G73-10) testauksen mukaan on viisivaiheinen [15]. Kuva 12 esittää eroosioasteen muutoksen viisi vaihetta ajan suhteen. Ensimmäisen vaiheen, eli niin sanotun inkubaatiovaiheen aikana materiaalivahingot ovat erittäin vähäiset, jopa olemattomat. Inkubaatiovaiheen aikana materiaalin pinta saattaa karheta tai muokkauslujittua [16]. Inkubaatiovaihetta seuraa kiihtymisvaihe, jonka aikana eroosioaste nousee nopeasti maksimiin [52]. Kolmannen vaiheen aikana eroosioaste on maksimiarvossa [15]. Neljäs vaihe on taantumisvaihe, jolloin eroosioaste laskee ja lopulta on vain $\frac{1}{2}$ tai jopa $\frac{1}{4}$ maksimiarvosta [52]. Viimeisen vaiheen aikana eroosioaste pysyy vakiona (tasainen lopullinen vaihe) [52]. Eroosioasteen yksikkönä voidaan käyttää poistunutta massaa tai paksuutta per aikayksikkö.

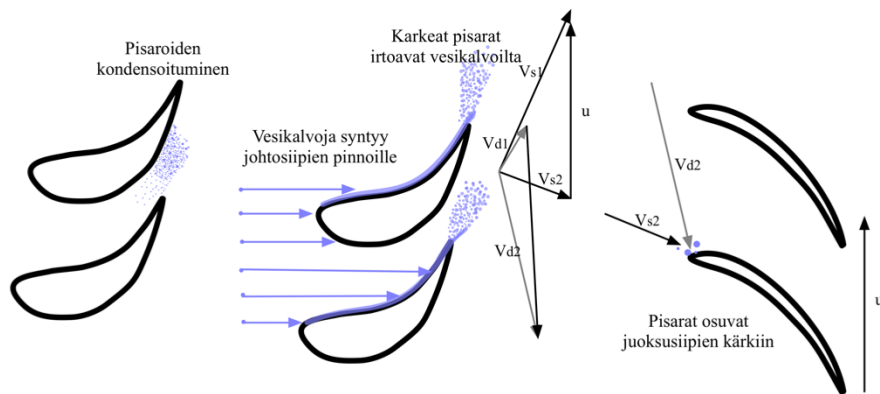
Vesipisaraeroosion mekanismeja on tutkittu 1900-luvun alusta asti ja niitä on pyritty mallintamaan erilaisin matemaattisin yhtälöin [53]. Materiaalin vesipisaraeroosiolle ei ole löydetty yksiselitteistä mekanisme tai laskentamallia, joten vesipisaraeroosion määrän tarkka ennustaminen on mahdotonta [52]. Vesipisaraeroosioon liittyy monia muuttuvia parametreja, joiden lisäksi jokainen turbiini käyttäytyy eri lailla [52]. Luotujen mallien avulla on kuitenkin mahdollista arvioida vesipisaraeroosion voimakkuutta. Ahmad ym. mukaan turbiinin siipien vesipisaraeroosio on riippuvainen kolmesta tekijästä: pisaroiden koosta ja nopeudesta sekä siipien pyörimisnopeudesta. Siipien pyörimisnopeus on mainituista ainoa tekijä, joka pystytään tarkkaa määrittämään. Pisaroiden käyttäytymistä pystytään arvioimaan vain teoreettisella tasolla. [54]

Höyryn faasimuutos vedeksi voidaan jakaa kahteen vaiheeseen, pisaroiden ydintymiseen ja syntyneiden pisaroiden kasvuun [55]. Gardner esitti vuonna 1963 julkaistussa artikkelissa [53], että suurin osa matalapaineisen höyryturbiinin pisaroista on syntynyt höyryn ydintymisestä ja on kooltaan alle $1\ \mu\text{m}$. Myöhemmin on arvioitu, että nämä primääriset pisarat ovat kooltaan alle $2,0\ \mu\text{m}$ [52]. Tutkitusti ensimmäisten muodostuvien pisaroiden koko on noin $0,01\ \mu\text{m}$ [53]. Osa pienimmistä pisaroista höyrystyy uudelleen osuessaan kuumalle pinnalle [53]. Uudelleen höyrystyminen aiheuttaa materiaaliin shokin, joka voi aiheuttaa paikallista faasimuutosalueen korroosiota. Gardnerin esittämiä

teorioita on käytetty uusien teorioiden pohjana. Gardner arvioi homogeenisesti kondensoituneiden pisaroiden kokoa kaavan (1) avulla [53].

$$\frac{1}{d} \frac{d(d)}{dt} = \frac{-16k\sigma T}{L^2 \rho_l^2 d^3}, \quad (1)$$

missä d on pisaran halkaisija, t on aika, k on höyryn lämmönjohtavuus, σ on veden pintajännitys, L on höyrystymislämpö ja ρ_l on veden tiheys. Esimerkeissään Gardner on todennut pisaran kasvun tarkan arvioimisen olevan mahdotonta, joten kaavaa ei voida pitää luotettavana, mutta sitä voidaan käyttää suuntaa antavana arviona. Kaavan avulla pystytään arvioimaan syntyvien pisaroiden kokoluokka. On kuitenkin todettu, että homogeenisesti muodostuneet primääriset pisarat ovat turbiinissa erittäin pieniä, eivätkä ne aiheuta eroosiota [53].



Kuva 13. *Pisaroiden kondensoituminen, vesikalvojen muodostuminen johtosiiville ja pisaroiden iskeytyminen juoksusiipien kärkein.*[51]

Kuten Kuvasta 13 voidaan havaita, osa primäärisistä pisaroista jää turbiinin siiville muodostaen puroja ja vesikalvoja [16]. Kuvassa u on juoksusiipien kärjen nopeus, V_{d1} ja V_{d2} ovat pisaroiden nopeudet ja V_{s1} ja V_{s2} ovat höyryn nopeudet. Vesikalvoja muodostuu etenkin paikoillaan olevien johtosiipien pinnoille [52]. Pisaroiden asettuminen siipien pinnalle on seurausta pyörteisestä diffuusiosta (etenkin erittäin pienet pisarat) tai inertiaefektistä [54]. Juoksusiivissä pinnoille kondensoituneet pisarat ajautuvat kohti siipien kärkeä ja turbiinin pesää, kun taas johtosiiville muodostuneet pienet purot ohjautuvat virtauksen vaikutuksesta kohti siiven jättöreunaa [54]. Höyryn virtaus irrottaa vesipisaroita muodostaen karkeista pisaroista koostuvan suihkun [54]. Johtosiipien pinnoille muodostuneista puroista ja vesikalvoista irtaantuneiden sekundäärisien pisaroiden koko voi olla jopa $1500 \mu\text{m}$ [52]. Pisarat jatkavat matkaa höyryvirrassa kiihtyvässä nopeudessa. Juoksusiipien kuperalta puolelta irtaantuneet pisarat voivat kiihtyä erittäin korkeisiin nopeuksiin [56]. Vesipisaroiden aiheuttama eroosio johtuu Gardnerin mukaan näistä suuremmista, sekundäärisistä pisaroista, jotka ovat irtaantuneet turbiinin siiville muodostuneista vesikalvoista [53]. Suurten pisaroiden kulkeutuessa voimakkaasti virtaavalle alueelle, ne hajoavat pienemmiksi noin $100 \mu\text{m}$ pisaroiksi [52]. Pisaroiden no-

peus kiihtyy höyryn virtauksessa ja kiihtyneet pisarat iskeytyvät metalliin aiheuttaen eroosiota [52]. Höyryvirtaan irronneet pisarat pääosin kiihtyvät vain murto-osaan höyryynnopeudesta [16]. Viimeisten juoksusiipien kuperalta puolelta irtoavat suuret pisarat jatkavat matkaa turbiinin periferia-alueille, eli tyypillisesti turbiinin pesän pinnoille aiheuttaen voimakasta vesipisaraeroosiota. Voimakkainta eroosiota aiheuttavat juoksusiiviltä irronneet pisarat, jotka eivät ole hajonneet höyryvirtauksessa pienemmiksi pisaroiksi. Juoksusiiviltä irronneet pisarat voivat olla lähellä juoksusiiven kärjen nopeutta.

Todellisen pisarakoon määrittäminen on käytännössä mahdotonta, mutta paikkaansa pitävien laskennallisten mallinnusten kannalta sen arvioiminen on olennaista [53]. Erikoisten pisaroiden jakautumisen mallintaminen höyryvirtauksissa antaa turbiinin suunnittelijoille arvokasta tietoa turbiinin kuormituksista ja materiaaliivaatimuksista [57]. Pisaroiden jakautumista kaksifaasisessa virtauksessa voidaan mallintaa matemaattisesti, mutta yksinkertaistetuissa mallinuksissa ei pystytä ottamaan huomioon pisaroiden todellista liikettä höyryvirrassa [57]. Virtauksia pystytään paremmin arvioimaan käyttämällä CFD (Computational Fluid Dynamics), eli laskennallista nesteen dynaamista mallintamista [57]. Turbiinien valmistajat voivat käyttää CFD-mallinnussovelluksia suunnittelussa apuna. CFD-mallinnusten käyttö vaatii täydellisen 3D-mallin turbiinista.

Mahdipoor on arvioinut, että kolme merkittävintä tekijää vesipisaraeroosion aiheuttajina ovat vesipisaran aiheuttama materiaaliin nähden kohtisuora paine, pisaran iskeytymisestä aiheutuvat stressi/shokkiaallot sekä törmäyksen jälkeen syntyvät nopeavirtauksiset pinnan myötäiset virtaukset. Jokainen edellä mainituista tekijöistä on riippuvainen vesipisaran iskeytymisnopeudesta. [58] Kun nestepisara iskeytyy kiinteälle pinnalle, pisaran sisälle kehittyy paineaalto, joka matkustaa kontaktipisteestä alkaen pisaran sisällä äänennopeudella [52]. Syntynyt shokkiaalto pysyy kontaktissa kiinteän pinnan kanssa niin kauan, kun kontaktinopeus on korkeampi kuin shokkiaallon nopeus, ja neste pysyy puristuneena kontaktissa [52]. Kun shokkiaallon nopeus ylittää kontaktinopeuden, se irtaantuu kontaktipinnasta [52]. Irtaantumishetkellä pinnan mukaisen virtauksen on havaittu olevan nopeudeltaan moninkertainen pisaran iskeytymisnopeuteen verrattuna [52]. Pisaran irtautumishetkellä myös iskeytymispaine on korkeimmillaan; Heymann arvioinut sen kasvavan noin kolminkertaiseksi niin sanottuun vesivasarapaineeseen nähden [16]. Pisaran aiheuttaman paineen arvioinnin pohjalla käytetään usein Cookin vesivasararelaatiota. Cookin vesivasararelaatiolla on pyritty arvioimaan vesipisaroiden aiheuttamaa painetta turbiinin pinnoilla [52]. Kaava (2) kuvaa materiaaliin aiheutuvaa shokkiaallon aiheuttamaa painetta yksinkertaisimmillaan [16].

$$P = \rho C_s V, \quad (2)$$

missä P on materiaaliin kohdistuva paine, ρ on nesteen tiheys (vedelle 1000 kg/m^3 , 4°C), C_s on shokkiaallon nopeus nesteessä, ja V on pisaran iskeytymisnopeus. Heymann esitti Cookin vesivasararelaation pohjalta kaavoja, joita on myöhemmin käytetty käy-

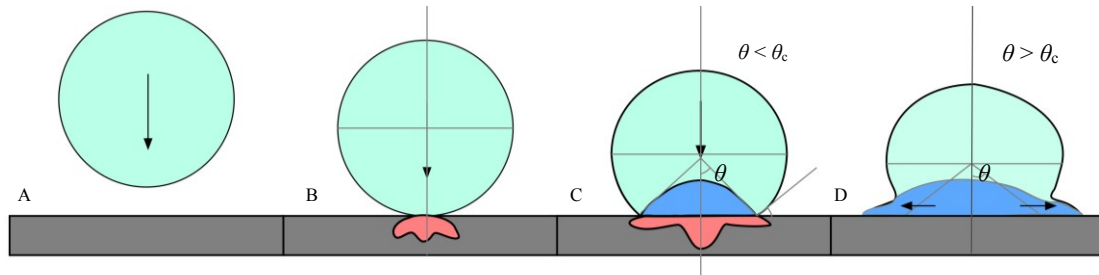
tännön tarkastelujen pohjana. Käytännön iskeytymisnopeuksille paine voidaan arvioida Heymannin esittämän kaavan (3) mukaisesti [16].

$$P = \rho C_0 V \left(1 + \frac{kV}{C_0} \right), \quad (3)$$

missä C_0 äänennopeus nesteessä (vedelle 1463m/s) ja $k=2$ vedelle [16]. Heymann jatkokehitti kaavaa (3) ottamaan huomioon shokkiaallon aiheuttaman paineen ja esitti pisaran aiheuttamalle paineelle seuraavan kaavan [58]:

$$P = \rho C_0 V \left(2 + (2k - 1) \frac{V}{C_0} \right). \quad (4)$$

Paineen suuruus on riippumaton vesipisaran koosta, mutta pisarakoko vaikuttaa kontaktin kestoon ja siten eroosion määrään [52].



Kuva 14. Vesipisaran iskeytymisestä aiheutuvan shokkiaallon ja pinnan mukaisen virtauksen muodostuminen.

Vesipisaran iskeytyminen materiaaliin on esitetty Kuvassa 14. Kuvassa punainen kuvastaa materiaaliin kohdistuvaa painetta ja sininen pisaran sisään muodostuvaa shokkiaaltoa ja shokkiaallon purkautumista pinnanmukaisena virtauksena. B-kuvassa vesipisara koskettaa ensimmäisen kerran materiaalin pintaa ja luo paineen materiaalin pintaan ja synnyttää pisaran sisäisen shokkiaallon. C-kuvassa näkyy kuinka iskun vaikutuksesta osa pisarasta puristuu sisään; tällöin pisaran kontaktikulma θ on pienempi kuin kriittinen kontaktikulma θ_c . Kun tilanteessa pätee $\theta > \theta_c$ pisaran sisäinen paine purkaantuu pinnanmukaisena virtauksena. [16] Ahmad ym. ovat numeerisesti todistaneet pisaran iskeytymisestä aiheutuvan jännityksen tunkeutumisen materiaaliin olevan riippumatonta pisaroiden koosta; kuitenkin jännityksen tunkeutumisen keston ja pisarakoon väliltä on löydetty lineaarinen riippuvuus [54].

Vesipisaran iskeytymisen vaikutukseen vaikuttaa moni tekijä, merkitseviä tekijöitä Kirols'n mukaan ovat i) materiaalin ja nesteen ominaisuudet; ii) geometriset tekijät kuten osumiskulma, pinnankarheus, pisaroiden koko ja muoto; iii) iskun nopeus. Suurimmat vaikuttavat tekijät ovat Kirols'n testien perusteella materiaalin mekaaniset ominaisuudet ja pinnan geometria. [15]

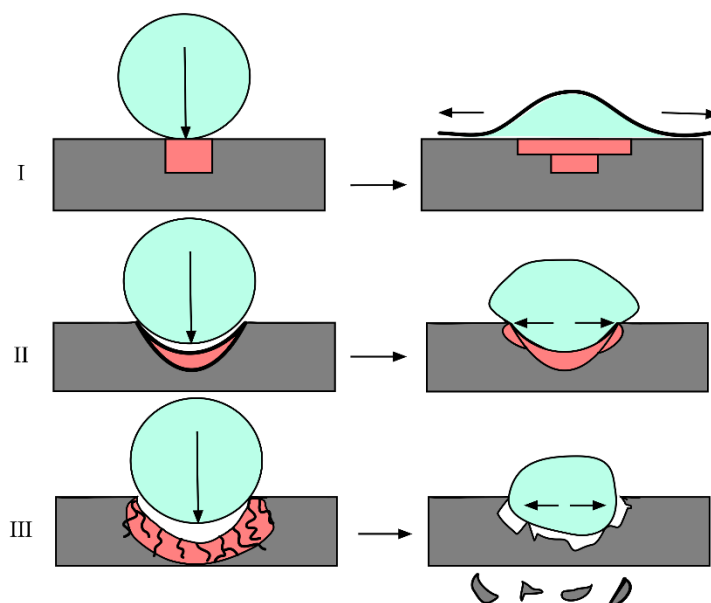
Eroosioriskin määrä pystytään matemaattisesti arvioimaan: yksinkertaisimmillaan siiven pyörimisnopeuden ja kosteuden funktiona [32]. Kosteuden nousun myötä pisaroiden määrä ja koko kasvavat. Pisarakoon suurentuminen ja pisaroiden iskeytymisnopeuden kasvaminen nostavat vesipisaroiden aiheuttaman eroosion määrää [51]. Myös pisaroiden määrän kasvattaminen lisää eroosioastetta [52]. Pisan iskeytymisnopeus on riippuvainen nesteen tiheydestä [52]. Suuremmilla höyryn paineilla höyryn tiheys on suurempi, mutta nesteen tiheys on pienempi; Gardnerin mukaan halkaisijaltaan yhtäläisistä pisaroista, suurempi tiheyksissä höyryssä pisara kiihtyy lähemmäs höyryn nopeutta [53]. Kallio esitti höyryturbiinien siipien vesipisaraeroosiota käsittelevässä diplomityössään [59], että suuret pisarat aiheuttavat vesipisaraeroosiota, koska ne eivät kiihdy pienten pisaroiden tapaan lähelle höyrynopeutta, minkä vuoksi suuret pisarat törmäävät siipiin. Gardnerin tutkimukset [53] tukevat Kallion väitteitä. Staattisten komponenttien vesipisaraeroosion määrä kasvaa pisan nopeuden kasvaessa.

Iskeytymisestä aiheutuvan paineen keston riippuvuus pisan koosta on esitetty kaavassa (5).

$$\Delta\tau = \frac{3rV}{2C_s^2}, \quad (5)$$

missä r on vesipisan säde ja C_s on vesipisan aiheuttavan shokkiaallon nopeus [58]. Paineen ajallinen kesto kasvaa pisan säteen ja iskeytymisnopeuden kasvaessa, mikä lisää eroosion määrää.

Vesipisaroiden kohdistama paine aiheuttaa plastista muodonmuutosta sitkeässä metallissa [51]. Pisaraeroosion itämisvaiheessa materiaalin massa ei välttämättä muutu, mutta pisaroiden aiheuttaman plastisen muodonmuutoksen seurauksena pinnan topografia saattaa muuttua [15]. Vesipisaraeroosion ja materiaaliominaisuuksien välistä yhteyttä on pyritty selvittämään [51]. Haag on jakanut vesipisaraeroosion etenemisen kolmeen vaiheeseen: i) pinnan karheutuminen; ii) mikrosäröjen muodostuminen ja niiden eteneminen; iii) materiaalin irtoaminen ja pistemäisten vaurioiden muodostuminen [15].



Kuva 15. Toistuvien pisaran iskeytymisten aiheuttama plastinen muodonmuutos ja perusaineen säröytyminen, punainen osoittaa jännityksen jakautumisen materiaalissa.

Sitkeissä materiaaleissa toistuvien pisaroiden iskujen osuminen samalle alueelle voi aiheuttaa pyöreän plastisen muodonmuutosalueen, josta pinnanmukaisen virtauksen aiheuttama paine voi irrottaa materiaalia. Tilanne on esitetty Kuvassa 15. Jos materiaaliin pienen paineen aiheuttavia iskuja tulee pienelle alueelle useita, ei välitöntä vahinkoa tapahdu. Kuvan 15:n ensimmäinen vaihe esittää kuinka materiaalin pintaan ja pinnan alle aiheutuu jännitystilaa, joka saa metallin myötämään. Tilanne vastaa eroosiokäyrän inkubaatiovaihetta. Kuvan toisessa vaiheessa on esitetty pinnan muodonmuutos; pienet iskut aiheuttavat materiaaliin palautuvaa elastista muodonmuutosta, mutta iskujen paineen ylittäessä materiaalin myötörajan metalli alkaa myötää plastisesti. Plastinen muodonmuutos vahvistuu toistuvien iskujen seurauksesta. Tällöin pintaan vähitellen muodostuu satunnaisia ja vaihteittain syntyviä kuoppia. Plastisen muodonmuutoksen seurauksena materiaali muokkauslujittuu. Sitkeän materiaalin itämisvaiheessa seuraukset voivat laajentua 30–50 µm pinnan alle. Kuvan 15 kolmannessa vaiheessa materiaali on muokkauslujittunut. Materiaaliin voi muodostua väsymissäröjen kaltaisia rakeiden läpi tunkeutuvia säröjä, jotka yhdistyessään poistavat materiaalista paloja. [16]

Hauraisiin materiaaleihin pinnanmukaisia säröjä voi muodostua vetojännitysaaltojen vaikutuksesta ympäri pisaroiden iskeytymisaluetta. Jos iskut kohdistuvat ohueen pintakerrokseen, materiaalia voi lohjeta irti iskeytymisen aiheuttaman vetojännityksenä heijastuvan puristusjännityksen vaikutuksesta. [16] Haurailta materiaaleilla ei esiinny sitkeiden materiaalien tapaan myötämistä tai plastista muodonmuutosta.

Pisaraeroosion ilmenemiseen liittyy materiaalista ja olosuhteista riippuva iskeytymisnopeuden kynnsarvo. Pisaraeroosion ilmenemiseen liittyvän pisaroiden iskeytymisnopeuden kynnsarvo on riippuvainen pisaroiden koosta, kun pisaroiden nopeudet ovat lä-

hellä nopeuden kynnysarvoa. Iskeytymisnopeuksilla, jotka ovat lähellä kynnysarvoa, suuremmat pisarat aiheuttavat huomattavasti merkittävämmät eroosioauriot. Pienten pisaroiden tapauksessa eroosion itämisaika on pidempi kuin suurilla pisaroilla. [58]

Vesipisaraeroosion vaikutusta voidaan kuvata vesipisaraeroosion vertailuarvon avulla. Hitachin kehittämä yksinkertaistettu juoksusiiven kärjen vesipisaraeroosion vertailuarvo (E) voidaan esittää höyrynkosteuden (y [%]) ja siivenkärjen nopeuden (u [m/s]) avulla [32, s. 105]:

$$E = 4,3 * (0,01u - 2,44)^2 y^{0,8}. \quad (6)$$

Jos vesipisaraeroosion vertailuarvolle pätee $E < 2$, vesipisaraeroosio ei ole läsnä; jos tilanteessa pätee $2 < E < 4$, kohtalaista vesipisaraeroosiota voidaan havaita; jos tilanteessa pätee $E > 4$, turbiinin materiaalit tulee suunnitella kestäämään vesipisaraeroosiota [32]. Kaavaa on laajennettu ottamaan huomioon turbiinin muodot, lisäämällä siihen jaksojen etäisyydestä ja johtosiipien jättöreunan paksuudesta riippuva vakio (K) ja höyrynpaine (p_0) [32, s. 298]:

$$E = y^2 * u^3 * \frac{K}{p_0}. \quad (7)$$

Eroosioaste pienenee höyrynpaineen noustessa. Pienemmillä höyrynpaineilla höyryn nopeus kasvaa ja pisarat pääsevät kiihtymään suurempaan nopeuteen höyryvirrassa.

Eroosioasteen riippuvuus materiaalin sitkeysominaisuuksiin voidaan kuvata Heymannin osoittaman kaavan (8) mukaan.

$$R_e \sim V^n, \quad (8)$$

missä V on iskeytymisnopeus ja n :n arvo sitkeille materiaaleille on 4-5 ja hauraille 6-9 [52]. Hauraiden materiaalien eroosioaste on sitkeitä materiaaleja suurempi. Myös tämän teorian mukaan pisaroiden koko vaikuttaa eroosioasteeseen. Pisan iskeytymiskulman on havaittu olevan merkitsevää eroosioastetta arvioitaessa [52]. Heymann on esittänyt vastaavasta yhtälöstä myös variaatioita, joista merkittävimmät on esitetty seuraavissa kaavoissa

$$R_e = aV^n, \quad (9)$$

$$R_e = a(V - V_C)^n, \quad (10)$$

$$R_e = ae^{V^n}, \quad (11)$$

missä a on vakio ja V_C on iskeytymisnopeuden kynnysarvo, jonka jälkeen eroosiota alkaa esiintyä. V_C on pienempi, mitä suuremmista pisaroista on kyse. Kaava (11) perustuu

eroosion aiheuttamaan väsymiseen; kaavaa ei ole kuitenkaan yhtä laajalti käytetty kuvaamaan eroosioastetta kuin kaavoja (9) ja (10). [58]

Materiaalien mekaaniset ominaisuudet vaikuttavat materiaalien vesipisaraeroosionkestoon. Ahmad ym. ovat tutkimuksissaan todenneet, että materiaalin kovuus, iskusitkeys, myötölujuus, sitkeys ja muodonmuutosenergia vaikuttavat merkittävästi materiaalin kykyyn kestää vesipisaraeroosiota. Ahmad ym. mukaan suoraa yhteyttä tietyn materiaaliominaisuuden ja materiaalin vesipisaraeroosion sietokyvyn välillä ei ole löytynyt. On kuitenkin todettu, että mainituista ominaisuuksista materiaalin kovuus antaa parhaiten viitettä materiaalin vesipisaraeroosion sietokyvystä. [52]

Heymann on kuvannut koejärjestelyistä kerätyn datan perusteella eroosioasteen olevan riippuvaista materiaalin murtolujuudesta (σ_m) ja kimmomoduulista (E) kaavan (12) mukaisesti [58]:

$$R_e^{-1} \propto \sigma_m^2 E. \quad (12)$$

Kun kaavaan (12) lisätään muokkauslujittumisen vaikutus olettaen, että materiaalin jännitys-myötymäkäyttäytyminen on Hooken lain mukaisesti lineaarista myötörajaan asti, ja että myötörajan jälkeen tapahtuva plastinen muodonmuutos noudattaa Hollomonin lakia, [58] myötörajalle voidaan kirjoittaa

$$\sigma_y = E \varepsilon_y = K \varepsilon_y^n \quad (13)$$

ja kimmomoduulille

$$E = K \varepsilon_y^{(n-1)}, \quad (14)$$

missä K on materiaalivakio, ε_y on myötymä myötörajalla ja n on vakio muokkauslujittumiselle [58]. Näin ollen kaava (12) voidaan kirjoittaa

$$R_e^{-1} \propto \sigma_m^2 \varepsilon_y^{(n-1)}. \quad (15)$$

Iskeytyvän pisaran lämpötila vaikuttaa hieman eroosioasteeseen: kuumemmat pisarat aiheuttavat enemmän eroosiota [52].

”ASTM Technical Committee G-2 on Wear and Erosion” sponsoroiman testiohjelman tuloksina saatiin laboratorio-olosuhteissa tehtyjen testien perusteella tuotettua yhtälöt eroosioasteelle sekä eroosion itämisvaiheelle [16]:

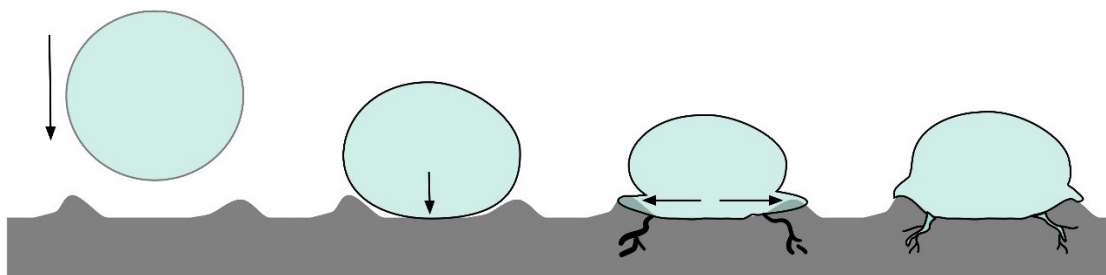
$$\log R_e = 4,8 \log V - \log NER - 16,65 + 0,67 \log d + 0,57J - 0,22K, \quad (16)$$

missä R_e on rationalisoitu maksimieroosioaste, V on iskeytymisnopeuden (m/s) normaali iskeytymispintaan nähden, d on pisaran halkaisija (mm), J on 0 yksittäisen pisaran is-

keytymiselle ja 1 jatkuvaa suihkua vastaan, K on 0 tasaisille iskupinnoille ja 1 pyöreille pinnoille, ja NER on eroosionkestonumero. NER hiiliteräkselle (110–190 HV) on 0,19 – 0,6, martensiittiselle ruostumattomalle teräkselle (200–400 HV) 0,6–3, Inconel hitseille 0,8. NER arvo on vertailuarvo suhteessa austeniittiseen AISI 316 ruostumattomaan teräkseen. [16] Kaava (16) on koottu laboratoriotutkimusten perusteella eikä se anna tarkkaa tietoa todellisesta vesipisaraeroosionsietokyvystä, mutta erityisesti maksimieroosioasteen on havaittu kuvaavan vesipisaraeroosion määrää. Todellisuudessa pisarakoko ja iskeytymisnopeudet vaihtelevat, joten kaavojen avulla ei pystytä kuvantamaan todellista hetkellistä eroosioastetta tai itämisvaihetta. Kaava (16) ei ota huomioon eroosioasteen aikariippuvuutta, joten sen avulla ei pystytä myöskään ennustamaan eroosioikäyttyytymistä pitkällä aikavälillä. [16] Kaavaa voidaan käyttää vertaillen eri materiaalien vesipisaraeroosion kestoa.

Materiaalin mekaanisten ominaisuuksien lisäksi materiaalin pinnan muodot vaikuttavat vesipisaraeroosion keston. Sileä pinta vastustaa paremmin vesipisaraeroosiota kuin karhea pinta [52]. Pinta, jonka materiaalin raekoko on pieni, vastustaa vesipisaraeroosiota paremmin kuin karkearakeinen [16]. Atomien välisen sidosvoiman sekä pinnan virheiden koon ja jakautumisen on huomattu vaikuttaneen materiaalin vesipisaraeroosionsietokykyyn [52]. Korkea myötölujuus ja suuri kiteiden välinen sidosenergia pidentävät vesipisaraeroosion inkubaatiovaihetta [56]. Myös materiaalin kiderakenteella on Mann'n tutkimusten [56] perusteella vaikutusta eroosionsietokykyyn.

Kuten aiemmin esitelty, vesipisaran osuttua materiaalin pintaan, se leviää pinnalla aiheuttaen suuren nopeuden omaavan pinnanmukaisen virtauksen. Sileälle pinnalle pisara leviää tasaisesti, mutta epätasainen geometria aiheuttaa virtauksen törmäämisen korkeampiin kohtiin vaurioittaen materiaalia tasaista pintaa enemmän. Epätasaiselle pinnalle iskeytyvän pisaran vaikutus on esitetty Kuvassa 16. Kirols ym. esittelivät [15] Bowdenin ja Bruntomin teorian siitä, että materiaalihäviöt johtuvat epätasaiselle pinnalle osuneiden pisaroiden aiheuttamista leikkausmurtumista.



Kuva 16. *Pisaran iskeytyminen epätasaiselle pinnalle.*

Epätasaiselle pinnalle iskeytyvät vesipisarot saattavat ydintää väsymisestä johtuvat säröt. Jos pinnan epätasaisuus on kooltaan vesipisaran halkaisijaa pienempi, sen muodostamat kulmat toimivat hyvänä alustana säröjen muodostumiselle. Pienet pisarat aiheuttavat näin ollen vähemmän vahinkoa epätasaisella pinnalla. Pinnan epätasaisuudet nos-

tavat paikallista jännitustasoa ja yhdessä pisan iskeytymisestä aiheutuvan pinnan mukaisen virtauksen kanssa vahingoittavat pintaa. Valmistuksen jälkeisellä pinnankarheudella on merkittävä vaikutus eroosion inkubaatiovaiheen pituuteen. Alkuperäinen pinnankarheus edistää eroosion synnyttämien pistemäisten vaurioiden syntyä. Pinnan epätasaisuuksien vähentäminen pienentää säröjen muodostumisen riskiä ja siten eroosion määrää pidentämällä eroosion inkubaatiovaihetta. Turbiinin siivet voidaan hioa, kiillottaa tai pinnoittaa sileämmän pinnan aikaansaamiseksi. Pinnankäsittely vaikuttaa materiaaliin muodostuviin jäännösjännityksiin. Jäännösjännitykset vaikuttavat materiaalin eroosiokäyttäytymiseen, eroosionkestoa alentavasti. Kirolsin tutkimusten [15] mukaan pinnan geometria vaikuttaa jäännösjännityksiä enemmän materiaalin eroosionsietokykyyn. [15]

Toisaalta, Kirols on esittänyt [15] myös pinnan epätasaisuuksien edistävän pinnalle muodostuvan vesikalvon syntymistä ja näin pienentää vesipisaraeroosion vaikutuksia. Kun pinnankarheus ylittää tilanteelle spesifin syvyyden, kosteudesta muodostuu pinnalle suojaava vesikalvo, joka vaimentaa tulevia pisaroiden iskuja ja vaimentaa eroosiota [15]. Materiaalin pinnalle muodostuva vesikalvo vähentää materiaaliin absorboituvan energian määrää, vähentäen näin eroosion määrää [51]. Metallin pinnalle syntyneellä vesikalvolla on merkittävä vaikutus iskujen vaimenemiseen, näin ollen vesikalvon paksuus on tärkeä tekijä arvioitaessa vesipisaroiden aiheuttamaa todellista eroosioastetta [60]. On kuitenkin huomioitava, että pinnoille muodostunut vesikalvo voi aiheuttaa materiaalin korroosiota eroosiokorroosion ja FAC:in muodossa. Vesikalvoista irtoaa myös aiempaa suurempia pisaroita, jotka lisäävät vesipisaraeroosion määrää.

Vesipisaraeroosion minimoimiseksi kosteiden alueiden höyryturbiineihin voidaan suunnitella kosteudenpoistot siipirivistöjen väliin. Toinen käytetty tekniikka on lämmittää johtosiipiä. Johtosiipien lämmittäminen saa vesipisarat haihtumaan [52]. Pisaroiden höyrystämisen on havaittu olevan kahdesta mainitusta tehokkaampi tapa [52], mutta höyrystyminen metallin pinnalta kuormittaa metallia muodostaen metallin pinnalle paikallisen faasimuutosalueen.

Vesipisaraeroosio voidaan yhdistää myös väsymiskorroosioon. Vesipisaroiden aiheuttamat vauriot voivat ydintää korroosioväsymisestä seuraavat vauriot [9]. Vesipisaroiden materiaaliin aiheuttavat voimat nostavat erityisesti turbiinin siipien jännityskonsentraatiota lisäten turbiinin siipien kuormitusta [56]. Korroosiota lisäävät höyryn epäpuhtaudet kiihdyttävät vesipisaraeroosiota [9]. Vesipisaraeroosio on lisäksi yhteydessä korroosiovaurioiden esiintymiseen. Höyryn epäpuhtauksien ja epäsuotuisien aineiden (esimerkiksi kloridien) konsentraatio saattaa nousta vesipisaroiden iskeytyminen aiheuttamassa kolossa kiihdyttäen korroosiota [56]. Kolossa nesteen pH voi laskea, mikä edesauttaa korroosioväsymisen ilmenemistä [56].

Vesipisaraeroosion vaikutuksia voidaan minimoida materiaalivalinnoilla tai pinnoitteilla [56]. Nostamalla materiaalin pinnan kovuutta pystytään parantamaan materiaalien pisa-

raeroosion kestävyyttä [56]. Kovuus ei itsestään riitä arvioimaan materiaalin vesipisaraeroosionkestoa. Myös materiaalin kiderakenteen on todettu vaikuttavan vesipisaraeroosion keston. Vertailemalla yhtenevän kiderakenteen omaavia teräslaatuja, kovemman teräksen voidaan todeta kestävän paremmin vesipisaroiden aiheuttamat iskut. Vertailemalla saman kovuuden omaavia teräksiä on todettu, että austeniittinen ruostumaton teräs vastustaa eroosiota paremmin kuin martensiittinen ruostumaton teräs. Koboltiseosten (kuten stelliittien, eli koboltti-kromi-wolframiseosten) on havaittu vastustavan eroosiota teräksiä paremmin suhteessa materiaalin kovuuteen. Stelliittien eroosion kesto on selitetty kovien hienojen karbidien yhteisvaikutuksella vahvan, sitkeän matriisin kanssa; toisaalta stelliittien kiderakenne muuttuu pisaroiden iskun vaikutuksesta. Alhaisen pinousvikaenergian on todettu olevan oleellinen tekijä austeniittisten terästen ja koboltiseosten eroosionkestossa. [16]

Materiaalin kyky muokkauslujittua vesipisaroiden iskujen vaikutuksesta edistää materiaalin eroosionkestoa [16]. Esimerkiksi teräksissä austeniittinen pinta vastaanottaa hyvin iskuenergiaa absorboimalla vesipisaroiden aiheuttaman shokkiaallon [56]. Teräksillä, joissa austeniittinen mikrorakenne muuttuu martensiittiseksi vesipisaroiden iskun vaikutuksesta, on todettu olevan erittäin hyvä vesipisaraeroosion sietokyky [16]. Austeniitin muuttuminen martensiitiksi aiheuttaa pintaan puristusjännityksen, mikä edesauttaa eroosionkestoa [56]. Materiaaliominaisuuksia on pystytty parantamaan karbidien liuotuksella [56].

Laserin avulla karkaistu teräksen pinta kestää vesipisaraeroosiota tutkitusti hyvin [56]. Karkaistun teräksen pinnan jäännösausteniitti saadaan muutettua laserkarkaisulla kovaksi martensiitiksi [61], mikä auttaa vesipisaraeroosion keston teräslaaduissa, joissa faasimuutos nostaa teräksen kovuutta.

Kosteiden turbiinien viimeiset siivet voidaan valmistaa myös kevyistä titaaniseoksista. Titaanin vesipisaraeroosionsietokyvyn on havaittu olevan huonompi kuin laserilla tai muulla menetelmällä karkaistulla seostetulla teräksellä tai stelliittipinnoitetuilla korkeakromisilla teräksillä. Laserkarkaisulla titaanin vesipisaraeroosionsietokykyä pystytään kasvattamaan merkittävästi. [62]

Koska materiaalien vesipisaraeroosion keston vaikuttavat merkittävästi materiaalin kovuus ja lujuus, höyryturbiinin kosteilla alueille sijoittuvien komponenttien materiaalivalinnoissa on otettava huomioon terästen kovuuteen ja lujuuteen vaikuttavat alkuaineet. Näitä ominaisuuksia voidaan säätää teräksen hiilipitoisuuden muutoksilla. Hiilellä on lujittava, kovettava ja karkenevuutta parantava vaikutus teräkseen. Lämpökäsittelyn aikana rauta voi muodostaa hiilen kanssa kovuutta lisääviä karbideja ja muodostaa teräkselle perliittisen, bainiittisen tai martensiittisen mikrorakenteen. Jos teräksessä on kromia, kromi reagoi herkästi hiilen kanssa muodostaen karbideja; tällöin kromin tuomat korroosionkestoa parantavat ominaisuudet heikkenevät, vaikka teräksen lujuusominaisuudet paranevat. Kromikarbidien muodostumista voidaan ehkäistä seostamalla te-

räkseen molybdeenia. Molybdeeni lisää teräksen karkenevuutta. Jos teräkseen seostetaan mangaania, teräkselle voidaan saada lämpökäsittelyllä kulumista kestävä austeniittinen mikrorakenne. [31]

Myös teräksen pinnanlaatuun voidaan vaikuttaa seosaineilla. Kun teräksen kovuutta kasvatetaan hiilipitoisuutta nostamalla, teräksen pinnanlaatu saattaa kärsiä. Teräksillä, joiden hiilipitoisuus on 0,15–0,30 %, pinnanlaatu on tyypillisesti korkeampi kuin muilla teräslaaduilla. Mangaanin lisääminen parantaa teräksen pinnanlaatua. Jos teräksen hiili- ja mangaanipitoisuudet ovat pienet, teräksen sisältämät epäpuhtaudet (erityisesti rikki), heikentää pinnanlaatua. [63]

Heymannin tutkimusten [16] perusteella kromi, mangaani ja koboltti ovat eroosionkestoa edistäviä seosaineita. Nikkelin lisääminen seokseen on tuottanut epäjohdonmukaisia tuloksia: 12 % kromia ja 4 % nikkeliä sisältävän teräksen on todettu omaavan paremman eroosionkestävyyden kuin pelkän 12 % kromia sisältävän teräksen, mutta toisissa teräslaaduissa nikkeli on heikentänyt eroosionkestoa. Erityisen korkea eroosionsietokyky on havaittu olevan teräksillä, joiden kromipitoisuus on noin 10 % ja mangaanipitoisuus 12 % ja joiden austeniittinen mikrorakenne muuttuu martensiittiseksi iskun vaikutuksesta. [16]

4. CASE STUDY: SALMISAAREN VOIMALAITOKSEN VÄLIPAINETURBIININ MATERIAALIONGELMAT

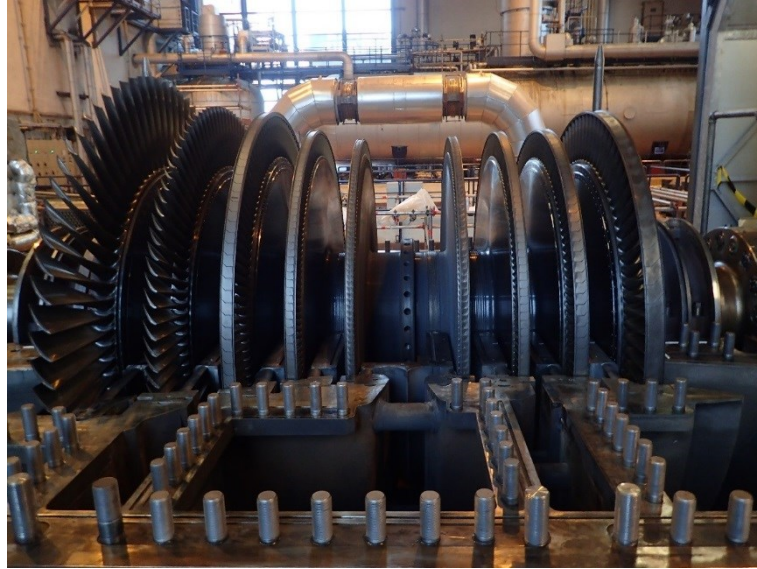
Tässä diplomityössä käsiteltyjen materiaaliongelmiä tutkimisessa on keskitytty Salmisaaren voimalaitoksen höyryturbiinin välipainepesän tilan tutkimiseen. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin lisäksi vertailun vuoksi tässä kappaleessa on esitetty myös Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten välipainepesien viimeisten väliottojen materiaalin tilaa. Turbiinien lisäksi tutkimuksiin sisällytettiin Salmisaaren KLV1:n ja KLV2:n tilan tutkiminen.

Salmisaaren turbiini modernisoitiin vuonna 2012, kun vanhassa turbiinissa ilmeni useita ongelmia. Vanhan turbiinin välipainepesän kulumista oli korjattu vuosien aikana useasti ja pesä oli pinnoitettu kulumisen pysäyttämiseksi. Sundberg tutki [64] vanhan turbiinin pesän ongelmia diplomityössään vuonna 1998. Työssä selvitettiin turbiinin korroosion syitä ja todettiin kulumisen johtuneen eroosiokorroosiosta. Nykyisen välipainepesän muodot ovat eroosio-ongelmien minimoimiseksi tehty vanhaa turbiinia pyöreämmiksi ja höyryn virtaus poikkeaa vanhasta. Muutoksista huolimatta uudessa turbiinissa on ilmennyt ongelmia. Turbiinin jakotaso ei ole pysynyt tiiviinä vaan turbiinissa on havaittu ilmavuoto. Johtosiipien ja johtosiipikannattimien jakotasoissa havaittiin eroosiovaurioita jo vuosihuollon 2014 aikana. Kuluneita kohtia korjattiin hitsaamalla Inconel 600 -lisäaineella [8]. Vuonna 2014 myös välipaineturbiinin pesä korvattiin uudella pesällä.

Turbiinista ei ole saatavilla CFD virtausmallinnusta, joten virtausten liike ja materiaaleille riskialteimmat kohdat pitää määrittää arvioimalla virtauksien voimakkuuksia, vertaamalla turbiinia kirjallisuuden viitteisiin sekä raportoimalla ja arvioimalla turbiinin avauksessa ilmenneet vauriot.

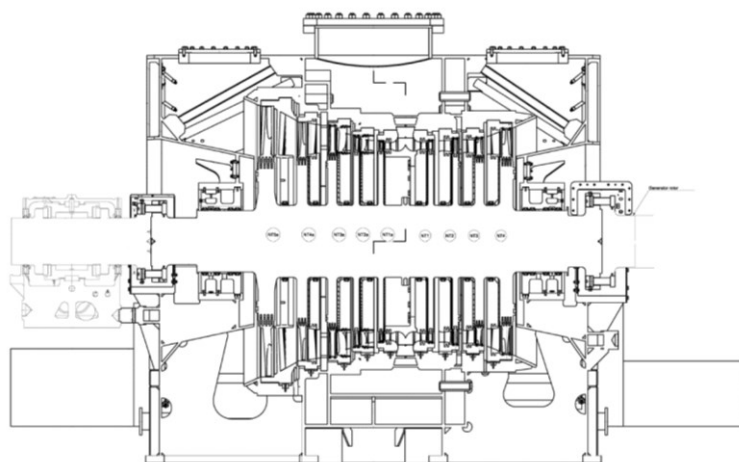
Kesällä 2016 turbiinin välipainepesä oli auki esiintyneen ilmavuodon takia. Turbiinin jakotasojen tiivistenauhat eivät olleet kestäneet turbiinin tulohöyryn lämpötilaa ja olivat haurastuneet. Vuoto korjattiin väliaikaisella ratkaisulla lisäämällä jakotasoon tiivistenauhan lisäksi grafiittinauhaa. Kesän 2016 jälkeen turbiinin jakotaso päätettiin korjata turbiinin valmistajan, Skodan suunnittelemana ja toteuttamana kesällä 2017. Kesän 2016 huollon aikana turbiinin välipainepesän viimeisissä väliotoissa huomattiin eroosio- ja korroosiota ja johtosiipikiekkujen jakotasojen todettiin kuluneen. Kevään 2017 aikana osana tätä diplomityötä tutkittiin mahdollisia vaihtoehtoja turbiinin korjauksille. Kesän 2016 tutkimusten perusteella pystyttiin toteamaan, että turbiinin välipainepesälle olisi tehtävä suojaavia toimenpiteitä joko vuoden 2017 vuosihuollon aikana tai viimeis-

tään silloin, kun turbiinin korkeapainepesä seuraavan kerran aukaistaan; viimeistään vuonna 2022. Vuosihuoltojen 2016 ja 2017 aikana havaittujen ongelmien lisäksi on otettava huomioon mahdollinen kaukolämmön menoveden lämpötilan optimointi. Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamisen seurauksena kosteuden oletetaan turbiinissa kasvavan ja näin materiaaliongelmiin mahdollisesti lisääntyvän.



Kuva 17. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiini.

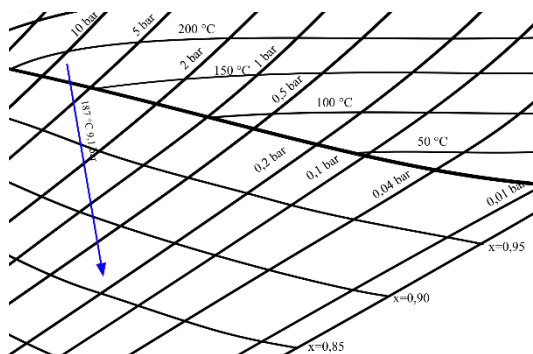
Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin on esitetty Kuvassa 17. Turbiinin Vo0 sijaitsee vasemmalla puolella, joten höyry paisuu pidemmälle vasemmanpuoleisissa jaksoissa. Vasemmanpuoleiset juoksusiivet ovat oikeaa puolta pidemmät ja jaksoja on yksi enemmän. Kuvassa vasemmalla on korkeapainepesän puoleinen pää ja oikealla on generaattorin puoli.



Kuva 18. Salmisaaren turbiinin vp-pesän poikkileikkaus [65].

Turbiinin välipainepesän poikkileikkaus on esitetty Kuvassa 18. Turbiinin välitotot sijaitsevat molemmissa päissä, Vo0 vasemmalla ja Vo1 oikealla, sekä Vo2 ja Vo3 turbiini-

nin keskellä. Turbiinin oikean puolen jaksot on numeroitu 1-4 ja vasemman puoleiset 1a-5a.



Kuva 19. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin suunniteltu paisunta Mollier-diagrammissa.

Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin vp-pesän suunniteltu paisunta on esitetty Kuvassa 19. Suunnittelussa paisunnassa tulohöyryn lämpötila on 187 °C ja paine on 9 bar. Todellisuudessa turbiinin paisunta siirtyy diagrammissa tulohöyryn arvojen vaihdellessa. Tämä paisuntakäyrä vastaa turbiinille tyypillistä paisuntaa ajettaessa täydellä teholla.

Tässä luvussa esitellään kesän 2017 tutkimuksien perusteella määritetty turbiinin kunto, eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion vaikutukset turbiinin paisunnan alueilla sekä kesällä 2017 tehdyt korjaustoimenpiteet ja tulevaisuuden korjaustarve.

4.1 Turbiinin tila vuosihuollossa 2017

Suunnitellessa kesällä 2017 tehtäviä korjaustoimenpiteitä, ei ollut tiedossa materiaalien todellista kuntoa, joten oli tukeuduttava kesällä 2016 kerättyyn tutkimusdataan. Kesällä 2016 huomattiin turbiinipesän eroosiokorroosio-ongelmat ja johtosiipikiekkojen jakotajien kulumisen. Lisäksi tiedostettiin, että turbiinin peräpäät eivät olleet pysyneet tiiviinä, vaan turbiinin peräpäähän oli päässyt vuotamaan ilmaa. Koska turbiinin keskiosan jaksot ovat ilmakehää korkeammassa paineessa, ei niiden voida olettaa kärsineen prosessiin päässeestä hapestasta ja hiilidioksidista. Turbiinin viimeiset välitotot ovat alipaineen puolella, joten ilmapuoto on vaikuttanut olosuhteisiin turbiinin peräpäissä.

Ajettaessa voimalaitosprosessi ylös tai alas, turbiiniin kohdistuu jännityksiä, jotka rasittavat erityisesti siipien ja roottorin materiaaleja. Turbiini on mitoitettu niin, että sillä vuoden aikana siinä saisi tapahtua 5-10 ylös- ja alasajoa [66]. Jos alas- ja ylösajoja tapahtuu mitoitetta enemmän, turbiinin eliniänennuste laskee. Epätasaisista ajotilanteista johtuvat jännitykset voivat ydintää korroosiovaurioita. Yhdessä vesipisaroiden iskeytymisen kanssa vauriot voivat olla huomattavia. Epätasaiset ajotilanteet voivat aiheuttaa turbiinissa jännityskorroosiota tai väsymistä. Suurin riski vaurioihin on faasimuutosalueella, eli Salmisaaren välipaineturbiinin tapauksessa ensimmäisten jaksojen kohdalla. Riskialue jatkuu noin viiden prosentin kosteuteen asti. Jos epäillään, että turbiiniin on

kohdistunut jännityksiä mitoitettua enemmän, juoksusiipien kiinnitykset olisi syytä tarkastaa säröjen varalta etenkin riskialueelta.

Pesän pinnoitukseen ja johtosiipien jakotasojen korjaukseen oli varauduttu kesän 2016 tutkimusten perusteella. Turbiinin pesästä ja johtosiipikiekoista ilmeni suurempi korjaustarve kuin alun perin oli odotettavissa.

4.1.1 Pesä

Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin kunnon tutkimiseen keskityttiin erittäin tarkasti ja pesän kunnosta tehdyt huomiot raportoitiin jokaisen työvaiheen aikana turbiinin avauksen yhteydessä. Mitä enemmän turbiinia avattiin ja mitä tarkemmin tilannetta päästiin tarkastelemaan, sitä enemmän ongelmia materiaaleissa ilmeni.

Turbiinin pesä on valmistettu kahdesta teräslaadusta S355J0 (1.0553) ja S235JR (1.0038). Pesän rakenne on levyrakenteinen ja teräksiä on käytetty normalisoidussa tilassa. Taulukossa 2 on esitetty pesän teräslaatuojen standardin mukaiset koostumukset [50]. Pesän jakotaso on valmistettu S235JR -laadusta.

Taulukko 2. Pesän hiiliteräslaatuojen koostumukset [50].

Teräslaatu	C	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Si	Al	Cu	Ni
S235JR, 1.0038	<0,17	<1,40	<0,035	<0,035	<0,012	-	-	-	-	<0,55	-
S355J0, 1.0553	<0,20	<1,60	<0,030	<0,030	<0,012	-	-	<0,55	-	<0,55	-

Kumpikin teräslaaduista kuuluu matalaseosteisten hiiliterästen ryhmään, eikä teräksiin ole seostettu kromia.



Kuva 20. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin jakotasossa oli havaittavissa höyryvuodosta seurannutta ruostetta jo ennen turbiinin avausta.

Jo ennen pesän avausta turbiinin jakotason vuodon seurauksia oli havaittavissa. Turbiinin jakotaso ja jakotason pultit olivat paikoin ruostuneet Kuvan 20 esittämällä tavalla. Pintaruoste vaikeutti jakotason pulttien ja mutterien irrottamista.



Kuva 21. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin sisällä sijaitsevat jakotason pultit; vasemmalla generaattorin päästä, oikealla turbiinin keskeltä.

Turbiinin luukuista pystyttiin tarkastelemaan pesän sisällä sijaitsevien jakotason pulttien ja niiden ympäristön kuntoa. Kuva 21 esittää kuinka, turbiinin päätyjen pulttien ympäriltä pinnan magnetiitti oli kulunut lähes täysin, mutta turbiinin keskellä olleet pultit ja pulttien ympäristö olivat lähes täysin magnetiitin peitossa. Turbiinin sisäpuoliset pultit vastaavat toisiaan joka puolella turbiinia, eikä niitä ole nimetty käytettäväksi spesifioidussa kohdassa, näin ollen pulttien pinnan kulumisen arviointi voi antaa viitteitä vain viimeisimmän huoltovälin kulumisesta.



Kuva 22. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin generaattorin pää (Vo1) ennen turbiinin avaamista.

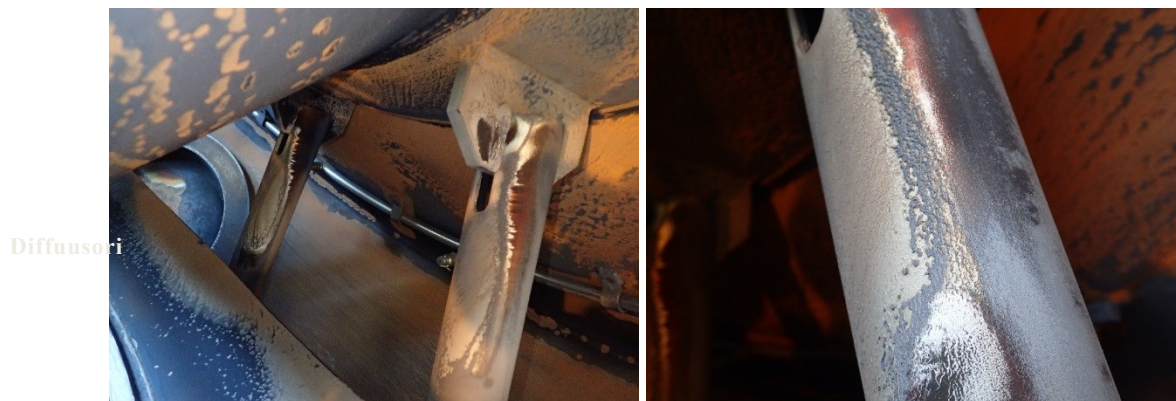
Kuva 22 on otettu turbiinin luukusta ennen pesän yläpuolen nostamista. Jakotason molemmin puolin turbiinin pesän pinnan magnetiitti oli kauttaaltaan kulunut ja pesän perusaine altistunut eroosiolle ja korroosiolle. Kuvan poikki kulkeva pesän tukitanko oli vastaavasti altistunut kulumiselle. Turbiinin diffusorin reunoilla oli havaittavissa puhallusjalkia.



Kuva 23. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin viimeiset väliotot ennen turbiinin avaamista; Vo1 (vasen) ja Vo0 (oikea).

Kuvassa 23 vasen kuva on otettu Vo1:n luukusta ja oikean puoleinen kuva Vo0:n luukusta. Molemmissa kuvissa höyryn kulkusuunta on vasemmalta oikealle ja alas kanaan. Vo1:n puoleisten tukiputkien ja seinämien magnetiitti oli lähes kauttaaltaan kulunut. Oikean puoleisen kuva esittelee Vo0:n tilanteen. Kuten Vo1:n tapauksessa, myös Vo0:n puoleiset tukitangot ja seinämät olivat altistuneet höyryn virtaukselle ja pintojen magnetiitti runsaasti kulunut.

Kun pesän yläpuoli nostettiin pois, päästiin turbiinin pintoja tarkastelemaan lähempää.



Kuva 24. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän yläosa, generaattorin pääty (Vo1), tukitangot ja diffuusori; oikealla lähikuva tukitangosta.

Kuva 24 esittää pesän yläpuolen tukitankojen kulumisen. Tukitangoissa oli havaittavissa turbiinin diffuusorin puoleisilla pinnoilla höyryn virtauksen aiheuttamat kulumisjäljet.



Kuva 25. Salmisaaren vp-turbiinin pesän yläosa, generaattorin päädyn tukitanko, lähikuva.

Tukitankojen magnetiittommat pinnat vaikuttivat etäisen tarkastelun perusteella tasaisilta. Lähietäisyyden tarkastelu osoitti pintojen olevan epätasaiset. Kuva 25 on lähikuva Kuvan 24 tukitangosta. Tukitangon pinnan magnetiitti oli liennut höyrynvirtauksen tulopuolelta. Magnetiittomalla alueella oli havaittavissa magnetiitin jäämiä ja kostean höyryn jättämiä virtausjälkiä. Ehyen magnetiitin ja altistuneen perusaineen väliin jääneen alueen magnetiitti oli kulunut huokoiseksi. Huokoisen magnetiitin havaittiin olevan kovaa ja lujasti kiinni perusaineessa. Tangot olivat kuluneet yhtäläisellä mekanismilla pesän ylä- ja alaosissa. Pesän alapuolen tukitangot olivat kuitenkin kuluneet laajemmalla alueella, eikä niissä havaittu yhtä voimakasta huokoisen magnetiitin välivyöhykettä kuin pesän yläosan tukitangoissa.

Vertaillen generaattorin (Vo1) ja kp-pesän (Vo0) puoleisia päätyjä, kp-pesän puoleisen diffuusorin pinnan magnetiitti oli kulunut lähes täysin. Pesän yläosan kp-pesän puoleisen päädyn diffuusori näkyy Kuvassa 26. Generaattorin puoleisessa diffuusorissa magnetiitti oli kulunut paikoin (esitetty Kuvassa 24). Turbiinin päätyjen kuntojen vertailu osoitti, että turbiinin molemmat puolet olivat kuluneet yhtäläisillä mekanismeilla. Pesän molempien puolien pintojen havaittiin olevan paikoin kulunut suhteellisen voimakkaasti turbiinin pesän ikä (3 v.) huomioon ottaen.



Kuva 26. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän yläosa, kp-pääty (Vo0).

Pesän yläpuolen korkeapainepesän päädyn toinen pääty on esitetty Kuvassa 26. Pesän yläpuolen tukitangoissa oli jäljellä pieniä alueita lukuun ottamatta ehyt magnetiittikerros. Pesän pinnoilla oli jäljellä pieniä määriä magnetiittia, mutta laajoilta alueilta pesän perusaine oli altistunut kulumiselle. Lisää kuvia Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesästä vuodelta 2017 on esitetty Liitteessä 3.



Kuva 27. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason läpipuhallusjäljet.*

Kuvassa 27 on pesän jakotason vuotokohta. Höyry on päässyt vuotamaan noin 1,5 cm leveän tiiviisteenä olleen grafiittinauhan alta.



Kuva 28. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason kulumisen tiivisteinä olleen grafiittinauhan vierestä.*

Jakotason tiivisteinä toimineen grafiittinauhan poiston jälkeen jakotasossa huomattiin kulkevan jakotason pinnan säröytyminen grafiittinauhan reunan kohdalla kts. Kuva 28. Särön todettiin olevan vain pintapuolinen, eikä sen odoteta vaikuttavan perusaineen käyttäytymiseen. Särö johtuu todennäköisesti kosteassa höyryssä muodostuneesta jakotason ja grafiittinauhan sähkökemiallisesta parista, jossa jakotason perusmateriaali on syöpynyt anodina. Metallien ja seosten galvaanisessa sarjassa grafiitti sijaitsee positiivisen sähkökemiallisen potentiaalin päässä lähellä erittäin jaloja kultaa ja titaania, kun

taas matalaseosteisen teräksen sähkökemiallinen potentiaali on negatiivinen ja näin matalaseosteinen teräs sijaitsee sarjan anodisessa päässä [67]. Koska jakotaso ei ollut täysin tiivis, oli pinnoille päässyt vettä ja näin sähkökemiallinen pari oli päässyt muodostumaan. Samasta syystä Kuvan 27 vuotokohta oli kulunut höyryn voiman aiheuttaman eroosion lisäksi korroosion vaikutuksesta.



Kuva 29. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason rakokorroosio.

Kuva 29 esittää kuinka, pesän jakotasojen väliin vuotanut vesihöyry oli aiheuttanut paikoin rakokorroosiota. Rakokorroosiossa neste pääsee väkevöitymään raossa ja aiheuttamaan teräksen paikallisen syöpymisen [68].



Kuva 30. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason kulumisen johtosiipikiekkon vierestä.

Kuvasta 30 esittää kuinka, höyryä oli vuotanut pesän jakotasolle myös johtosiipikiekkon ja pesän välistä, ja aiheuttanut paikoin johtosiipikiekkujen viereisten alueiden pesän jakotason kulumisen.

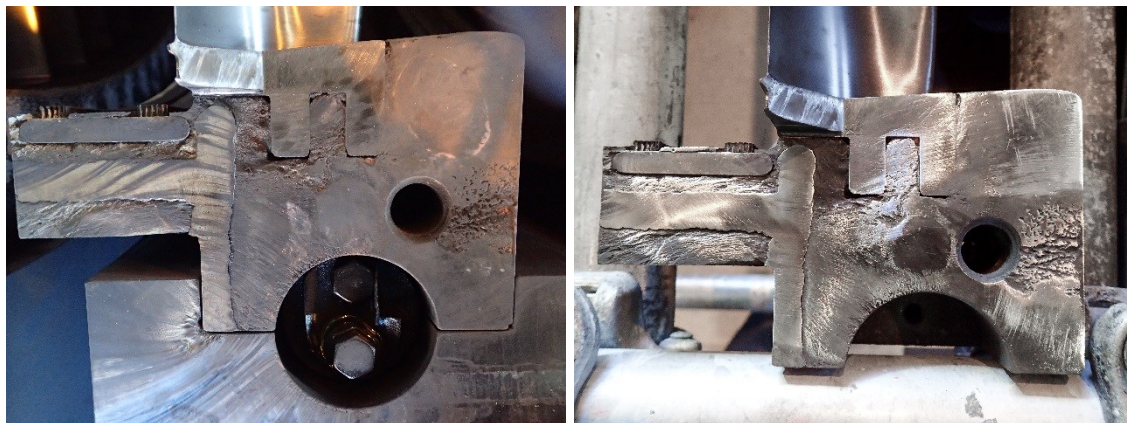
4.1.2 Johtosiipikiekot

Pesän jakotason vaurioiden lisäksi jo vuoden 2016 tutkimusten perusteella pystyttiin toteamaan, että johtosiipikiekkojen jakotasot saattaisivat vaatia lisää korjausta. Kiekkojen tutkiminen osoitti, että eroosion ja korroosion jälkiä oli havaittavissa jokaisen kiekon jakotasossa. Kesällä 2017 paljastui, että johtosiipikiekkojen 2 ja 2a jakotasot olivat kaikkien kiekkojen jakotasoista voimakkaimmin kuluneet. Seuraavaksi eniten olivat kuluneet jaksojen 3 ja 3a jakotasot. Johtosiipikiekkojen 4 ja 4a jakotasoissa oli jaksoihin 2-3a verrattavia jälkiä, mutta kulumisen ei ollut yhtä voimakasta kuin edellisissä jaksoissa. Jaksossa 5a oli havaittavissa vastaavaa ilmiötä kuin toisissa johtosiipikiekoissa, mutta materiaalin spesifisen kulumisen voidaan arvioida olleen kiekon jakotasossa vähäistä. Johtosiipikiekkojen 1 ja 1a jakotasoissa oli joitain kulumisen jälkiä, mutta muiden kiekkojen jakotasoissa oli laajoilla alueilla selkeitä merkkejä kostean vesihöyryn aiheuttamasta korroosiosta. Johtosiipikiekkojen materiaali on S355J0 (1.0553). Johtosiipien materiaali on X12Cr13 (1.4006). Johtosiipien ja johtosiipikiekkojen materiaalien standardin mukaiset koostumukset on esitetty Taulukossa 3.

Taulukko 3. Johtosiipikiekkojen ja -siipien standardien mukaiset koostumukset [50].

Teräslaatu	C	Mn	P	S	N	Cr	Si	Cu	Ni
X12Cr13, 1.4006	0,08– 0,15	<1,50	<0,040	<0,015		11,50– 13,50	<1,00		<0,75
S355J0, 1.0553	<0,20	<1,60	<0,030	<0,030	<0,012	-	<0,55	<0,55	-

Johtosiipikiekkojen kovuuksia mitattiin turbiinin huollon yhteydessä. Kiekon kovuuden todettiin olevan noin 140 HV, johtosiipien noin 200 HV ja jakotason korjaushitsien noin 170 HV. Mittaukset tehtiin käyttäen Equotip2-kovuusmittaria. Equotip-mittari mittaa kovuutta materiaaliin singottavan kuulun avulla. Kovuus saadaan mitattua vertaamalla kuulun iskeytymis- ja takaisinkimpoamisnopeuksia [69]. Mittausten tulokset eivät vaihdelleet merkittävästi verratessa eri kiekkoja ja eri kohtia kiekkoista. Mitattujen kovuuksien poikkeamat voitiin selittää mittauksen epätarkkuudesta johtuvalla virhemarginaalilla. Mittaustuloksiin vaikutti mittaajan käden vakaus ja mittarin asento. Saatu mittausdata korjattiin mittarin ilmoittamilla asentokertoimilla. Kovuusmittauksia tehtiin myös Sonodur-kovuusmittarilla, joka käyttää kovuuden mittaamiseen ultraääntä. Mittaukset vastasivat Equotip-mittarilla mitattuja kovuuksia, mutta tulosten paikallinen hajonta oli huomattavasti Equotip-mittauksia suurempi.



Kuva 31. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotaso; vasemmalla johtosiipikiekko pesään kiinnitettynä, oikealla pesästä telineeseen nostettuna ja puhdistettuna.

Johtosiipikiekkojen jakotasojen pinta todettiin vaurioituneeksi heti turbiinin avauksen yhteydessä. Kuva 31 esittää jakson 2 johtosiipikiekon jakotason vaurioiden ilmenemistä heti turbiinin avauksen jälkeen ja kun jakotasot oli puhdistettu liasta, kerrostumista ja oksidikalvosta. Putsauksen jälkeen jakotasojen vaurioiden huomattiin olevan paikoin erittäin syviä.



Kuva 32. Lähikuva Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon johtosiiven ja jakotason korjaushitsin välisestä kulumisesta.

Jakotasojen tarkastelusta voitiin huomata, että vuonna 2014 tehdyt korjaushitsaukset olivat pysyneet kulumattomina, samoin johtosiipien materiaali. Kuva 32 esittää kuinka, johtosiipikiekon perusaine oli kulunut voimakkaimmin siiven kiinnityksen ja korjaushitsauksen välistä. Tilannetta voidaan tarkastella paremmin Kuvan 32 oikeanpuoleisesta lähikuvasta. Muualla jakotasolle vuotanut höyry oli päässyt liikkumaan vapaasti, mutta törmätessään eroosiokorroosiota kestävässä materiaaliin hiiliteräksen paikallinen kuluminen oli voimistunut höyryn pyörteilyn seurauksena. Koska kosteaa vesihöyryä oli päässyt kertymään jakotasoihin muodostuneisiin kuoppiin, oli rakokorroosio kuluttanut materiaalia. Lisäksi ruostumaton teräs ja Inconel 600 ovat hiiliterästä korkeam-

malla sähkökemiallisessa sarjassa [67], mikä saattaa kiihdyttää korroosiota galvaanisen korroosion vaikutuksesta.



Kuva 33. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotason korjaushitsien viereisen perusaineen kulumaa; vasemmalla jakotason ja johtosiiven välinen kulma, oikealla jakotason ja pystytiivistepinnan välinen reuna.

Kuva 33 esittää johtosiipikiekkojen jakotason viereisten pintojen tilan. Korjaushitsien viereisen perusaineen kulumisen ei ollut ongelma vain kiekkojen jakotasolla, vaan materiaalin perusaineen erodoitumista oli tapahtunut myös jakotason viereisillä pinnoilla. Jakotason viereisten johtosiipien ja jakotason väliin jäävään kulmaan oli johtosiipien välistä päässyt höyryä, joka oli kuluttanut kiekon perusaineeseen uria; vieressä ollut korjaushitsi oli voimistanut kulumista.



Kuva 34. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 2 johtosiipikiekon jakotaso ja jakotason kiilan puhallusjäljet.

Paikoin johtosiipikiekkojen jakotason kiilan viereen oli höyry päässyt kuluttamaan Kuvas-
sa 34 esitettyjä uria. Höyry oli kulkenut johtosiipikiekon jakotasolla; höyryn tulo-
suunta on kuvassa vasemmalta oikealle. Tilannetta tarkastellessa huomattiin, että johto-
siipien kiinnityksen välistä höyry on päässyt kulkemaan johtosiipien ohi johtosiipiek-
kon jakotasolle. Höyryn jäljistä voitiin päätellä, että höyry on päässyt kulkemaan joko-

tason kiilan ali ja vierestä. Höyry ei ole päässyt kulkemaan vapaasti jakotason läpi, mikä on korostanut jakotason kulumista. Voimakkaimmin kiilan vierestä oli kulunut kiekon jakotason tulopuolen reuna, mikä on esitetty Kuvan 34 oikeanpuoleisessa lähikuvassa.

Jakotasovaurioiden lisäksi johtosiipikiekkojen pystytiivistepinnoilta paljastui paikoin erittäin runsaita puhallusjälkiä.



Kuva 35. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jaksen 2 johtosiipikiekon pystytiivistepinnalla havaitut puhallusjäljet.

Kiekkojen 2, 2a, 3, 3a ja 4a pystytiivistepinnoissa havaittiin Kuvan 35 esittämiä puhallusjälkiä. Vastaavia jälkiä havaittiin myös kiekkoissa 1 ja 1a. Jaksen 2 johtosiipikiekossa höyryn kuluttava vaikutus on ollut paikoin erittäin voimakas. Kiekon pintaan on syntynyt höyryn syömiä uria ja niiden kohdalla viereiseen pintaan on syntynyt höyryn syömiä kuoppia. Pystytiivistepinta ei ole ollut täysin tiivis ja näin osa höyrystä on päässyt kiertämään johtosiipikiekon kiekon ja pesän välistä. Vastaavaa kulumista havaittiin myös johtosiipikiekkojen pohjakiilojen paikan kohdalla. Pesän puoleisilla kiekkojen vastinpinnoilla oli myös merkkejä läpipuhalluksen aiheuttamasta materiaalin kulumisesta.

Koska Salmisaaren voimalaitoksen turbiini on aktiokone ja höyryn paisunta tapahtuu vain johtosiivissä, johtosiipikiekkojen pystytiivistepintaan kohdistuu voimakas paine. Jos pinta ei ole tiivis ja höyry pääsee virtaamaan johtosiipien ohi, turbiinin hyötysuhde laskee. Höyryn paisunta oli aiheuttanut johtosiipikiekkojen kulumista myös johtosiipien juurien vierestä. Johtosiipien kiinnitykset eivät ole olleet täysin tiiviisti yhdessä, vaan höyry on päässyt työntymään kiinnityksien välistä. Johtosiipien juuren viereisiä reikiä oli havaittavissa kiekkoissa 1-3a.



Kuva 36. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 2 jättöpuolen pinnan korroosio; vasemmalla ennen hiekkapuhallusta ja oikealla hiekkapuhalluksen jälkeen.

Johtosiipikiekkojen jättöpuolen pintojen todettiin syöpyneen korroosion vaikutuksesta; tilanne on esitetty Kuvassa 36. Ennen hiekkapuhallusta pinnan rosoisuuden ajateltiin johtuvan epätasaisesti kuluneesta magnetiitista, mutta hiekkapuhalluksen jälkeen selvisi rosoisuuden johtuvan perusaineen kulumisesta. Vastaavaa pinnan kulumista havaittiin kiekkojen 2-4a pinnoilla.



Kuva 37. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 3 johtosiipikiekon tulopuolen pinta.

Vastaavaa pintojen korroosiota todettiin esiintyvän myös kiekkojen tulopuolella. Kuva 37 esittää, kuinka johtosiipikiekon 3 tulopuolen pinta on kulunut siipien kiinnitysnastojen ympäriltä. Nastojen ympäriltä pinnan magnetiitti oli kulunut.

Kiekkojen 2-3a hunajakennottiivisteiden viereisten pintojen huomattiin kuluneen paikoin erittäin voimakkaasti. Kiekoissa 2 ja 2a hunajakennoja paikallaan pitävien reunojen todettiin kuluneen puoleen alkuperäisestä ainevahvuudesta. Kiekoissa 3 ja 3a hunajakennojen viereinen kuluminen ei ollut yhtä voimakasta kuin kiekkoissa 2 ja 2a. Kiekoissa 2 ja 2a osasta hunajakennottiivistepalojen väleistä materiaali oli kulunut täysin. Höyryn

virtaus roottorin viereisissä labyrinthitiivisteissä oli aiheuttanut kulumista labyrinthitiivistesegmenttien urissa.



Kuva 38. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 5a pinta.*

Viimeisen johtosiipikiekon (5a) kuluminen poikkesi muiden kiekkojen kulumisesta. Kuva 38 esittää johtosiipikiekon 5a tilan. Kyseisen kiekon rakenne poikkeaa muista johtosiipikiekoista, sillä johtosiivet on hitsattu kiekkoon kiinni. Kiekon pinnan magnetiitti oli kulunut kauttaaltaan laikukkaaksi.



Kuva 39. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 5a juoksusiipien kärkien viereinen pinta.*

Johtosiipikiekon 5a pinnoilta, jotka olivat juoksusiipien kärkien läheisyydessä, magnetiitti oli kulunut täysin. Kuva 39 esittää kuinka, johtosiipikiekon materiaali oli kulunut johtosiipien hitsien ympäriltä ja aiheuttanut hitsin alle raon. Pintojen lähempi tarkastelu osoitti, että pinta oli kulunut vesipisaroiden iskeytymisen seurauksena. Vastaavaa kulumista oli havaittavissa myös kiekossa 4a. Kiekoissa 4a ja 5a ei ole hunajakennotiivistettä, joten kiekkoista ei irtoa helposti osia materiaalin kulumisen seurauksena. Lisää kuvia johtosiipikiekoista on esitetty Liitteessä 4.

4.1.3 Juoksusiivet ja roottori

Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin roottorin materiaali on 27NiCrMoV15-6 +QT (1.6957). Roottori on valmistettu takeena. Juoksusiivet on valmistettu viimeisiä juoksusiipiä lukuun ottamatta X12Cr13 +QT (1.4006) ruostumattomasta teräksestä. Viimeisen jakson juoksusiipien materiaali on X22CrMoV12-1 +QT (1.4923). Merkintä +QT tarkoittaa, että materiaali on lämpökäsitelty karkaisemalla ja päästämällä. Roottorin ja juoksusiipien materiaalien standardinmukaiset koostumukset on esitetty Taulukossa 4.

Taulukko 4. Roottorin ja juoksusiipien materiaalien standardinmukaiset koostumukset [50].

Teräslaatu	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Si	Ni	V
27NiCrMoV15-6, 1.6957	0,22–0,32	0,15–0,40	<0,010	<0,007	1,20–1,80	0,25–0,45	<0,15	3,40–4,00	0,05–0,15
X12Cr13, 1.4006	0,08–0,15	<1,50	<0,040	<0,015	11,50–13,50	-	<1,00	<0,75	-
X22CrMoV12-1, 1.4923	0,18–0,24	0,40–0,90	<0,025	<0,015	<11,00–12,50	0,80–1,20	<0,50	0,30–0,80	0,25–0,35

Roottorin ja juoksusiipien materiaalien valmistuksen yhteydessä mitatut lujuudet ja kovuudet on listattu Taulukossa 5.

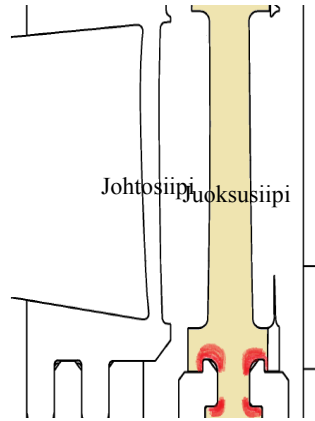
Taulukko 5. Roottorin ja juoksusiipien materiaalien valmistuksen aikana mitatut ominaisuudet [66].

Teräslaatu	R _{p0,2} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	Kovuus (HV)
27NiCrMoV15-6, 1.6957	n/a	n/a	275
X12Cr13, 1.4006	534–573	692–737	195–235
X22CrMoV12-1, 1.4923	710–737	887–909	252–292

Turbiinille on tehty edellisen kerran laajat tarkastukset vuonna 2014, joten käyttötuntien perusteella vuonna 2017 tehtävien tarkastustoimenpiteiden laajuuden ei tarvitsisi olla 100 %. Kuitenkin viimeisten vuosien aikana ilmenneiden ongelmien seurauksena turbiinille suositeltiin tehtäväksi laajemmat tarkastukset. Juoksusiipien tarkastus suositeltiin tehtäväksi pistokokein. Faasimuutosalueella sijaitsevien siipien kiinnitykset suositeltiin tarkastettavaksi muita suuremmalla laajuudella säröjen osalta.

Siipien säröjen tarkastukseen on mahdollista käyttää magneettijauhe- tai pyörrevirtatarkastusta. Kumpikin näistä menetelmistä on kuitenkin haastava siiven kiinnityksen säröjen etsinnässä. Vuonna 2015 Hanasaaren voimalaitoksen turbiinista säröjä etsittiin vaiheistetun ultraäänitutkimuksen avulla. Tällä menetelmällä pystyttiin havaitsemaan siiven kiinnityksestä säröjä, joita ei muilla menetelmillä nähty. Ensimmäisten jaksojen

juoksusiipien kiinnitys on kuitenkin vaikean mallinen säröjen etsinnän kannalta. Siipien kiinnityksen tyyppi on esitetty Kuvassa 40. Kuvaan on merkitty kohdat, joihin säröt ensimmäisenä todennäköisesti syntyvät jännitysten ja väsymisen seurauksena. Kiinnityksen t-mallinen muoto estää ultraäänen suoraviivaisen kulkeutumisen kiinnityksen kaikkiin kulmiin, joissa säröjen muodostumisen riski on suuri.



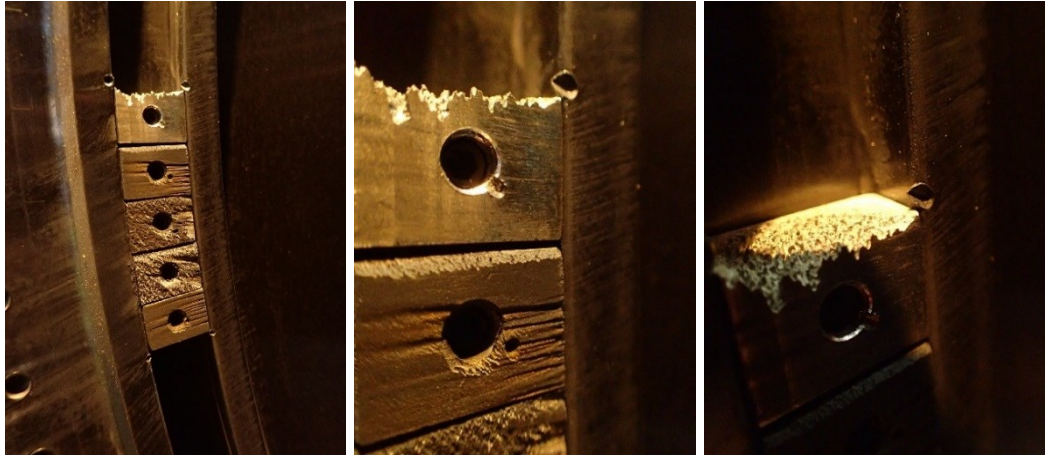
Kuva 40. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin toisen jakson juoksusiipi (keltainen), kiinnityksen säröytymisen riskialueet punaisella.

Siiven kiinnityksen tarkastusmahdollisuuksia selvitettiin koekappaleen avulla ja todettiin, että käsin tehtävä vaiheistettu ultraäänitarkastus sisältää liikaa muuttujia, jotka saattavat johtaa vääriin havaintoihin tai säröjen havainnoimattomuuteen. Näin ollen siipien ja siipien kiinnityksen tarkastamiseen päätettiin valita magneettijauhetarkastus. Ilman siipien irrotusta siiven kiinnityksessä olevista mahdollisista säröistä pystytään havaitsemaan vain pintaan aukeavat ja pinnan välittömässä läheisyydessä olevat säröt.



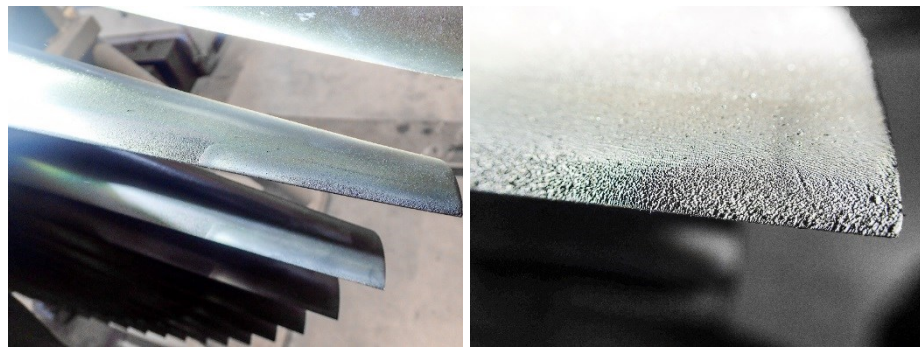
Kuva 41. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin roottori nostettuna pois turbiinin pesästä.

Turbiinin roottori nostettiin Kuvan 41 mukaisesti pukeille pesän huollon ajaksi. Roottorin takeen ja juoksusiipien kunto tarkastettiin silmämääräisesti ja magneettijauhetarkastuksella. Roottorista tai siivistä ei löytynyt pintaan aukeavia säröjä.



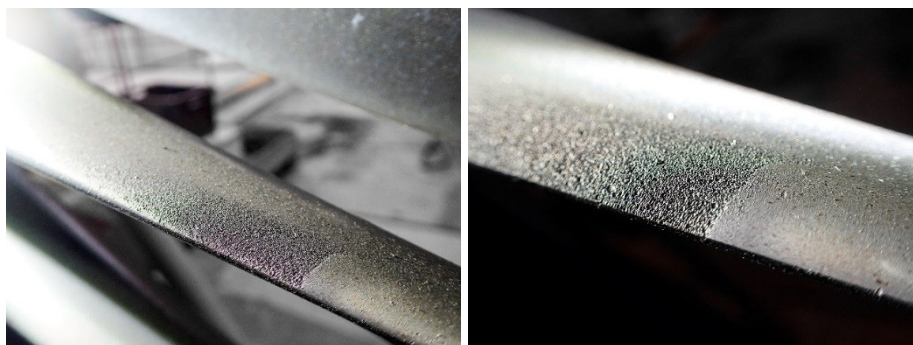
Kuva 42. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin roottorin kiekkojen tasapainotuspaloja.*

Roottorin pyörimisen tasaamiseksi roottorin kiekkoihin on asetettu Kuvan 42 mukaisia tasapainotuspaloja. Osa tasapainotuspaloista oli kulunut Kuvan 42 esittämällä tavalla. Roottorin tasapainotustarpeesta ei ole käytön aikana ollut merkkejä, joten tasapainotuspaloille ei nähty uusimistarvetta.



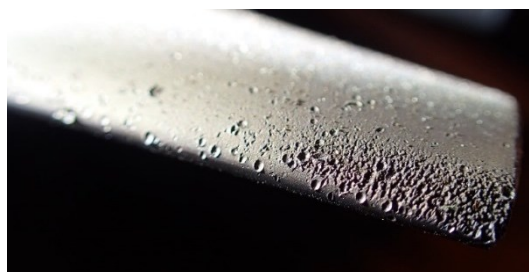
Kuva 43. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 5a juoksusiipien vesipisaraeroosio.*

Viimeisen jakson juoksusiipien kärjet on vahvistettu vesipisaraeroosiota vastaan. Vahvistuksesta huolimatta siivet ovat kärsineet vesipisaraeroosiosta vahvistetulla alueella sekä vahvistetun alueen ulkopuolelta. Kuva 43 esittää juoksusiipien kärjen vaurion. siiven kärjen vahvistus on suojannut siipeä pahimmilta vaurioilta, eikä vahvistuksen sisäreuna ei ole vahingoittunut. Vahvistuksen jälkeen siiven perusmateriaalissa ja siiven vahvistetussa kärjessä voidaan havaita vesipisaroiden vaikutus.



Kuva 44. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 5a juoksusiiven vahvistuksen ja perusaineen raja.

Kuva 44 esittää jakson 5a juoksusiiven kärjen vahvistuksen ja perusaineen välinen rajapinta. Vesipisarat ovat muokanneet siiven pintaa vahvistetun alueen vierestä, mutta eivät vahvistetun alueen sisäreunasta.



Kuva 45. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 4a juoksusiiven kärjen vesipisaraeroosio.

Jakson 4a juoksusiipien kärkiä ei ole vahvistettu jakson 4a tavoin. Jakson 4a juoksusiivet on valmistettu eri materiaalista kuin jakson 5a siivet. Kuva 45 esittää jakson 4a juoksusiiven kärjen. Jakson 4a juoksusiipien kärjissä on jälkiä vesipisaraeroosiosta. Osa suurimmista jäljistä voi olla peräisin myös kiinteän aineen aiheuttamasta eroosiosta.

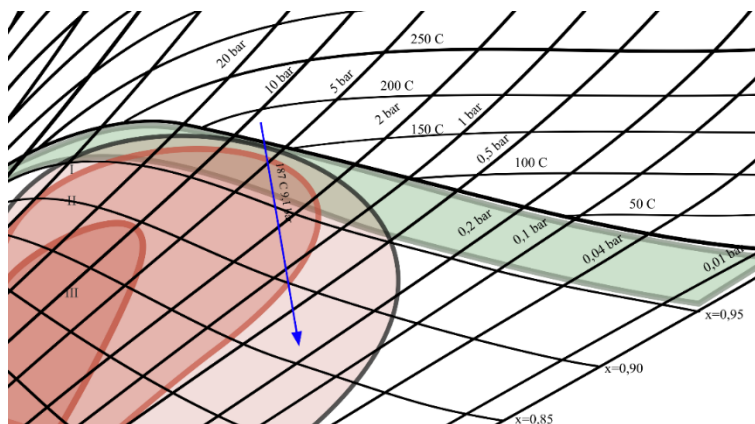
4.2 Vaurioiden yhteys turbiinin paisuntaan

Tässä kappaleessa on verrattu raportoituja materiaalivaurioita turbiinin paisunnan sijaintiin Mollier-diagrammissa. Ensin on käsitelty eroosiokorroosion esiintymistä turbiinissa, jonka jälkeen on pyritty arvioimaan vesipisaroiden iskeytymisen aiheuttamia paineita ja eroosioastetta.

4.2.1 Eroosiokorroosio Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa

Pesän kulumisen voidaan katsoa johtuvan magneetiikkalvon liukenemisen aiheuttamasta eroosiokorroosiosta yhdessä kaksifaasisen FAC:n ja vesipisaraeroosion kanssa. Johtosiipikiekot ovat kuluneet väkevän kondensoituneen höyryn aiheuttamasta läpipuhalluk-

sen kiihdyttämästä korroosiosta. Höyryn vaikutus on voimakkain eroosiokorroosion alueella Mollier-diagrammissa. Pinnoille ei tällä alueella synny perusainetta suojaavaa oksidikalvoa tai syntynyt kalvo liukenee pois.



Kuva 46. Eroosiokorroosioalueen sijoittuminen Mollier-diagrammissa (punainen alue) ja SaB vp-paisuntakäyrä tulohöyryn arvoilla 187 °C ja 9,1 bar. I) Lievä, II) vakava, III) erittäin vakava eroosiokorroosio.

Kuva 46 esittää turbiinin suunnitellun paisunnan ja eroosiokorroosioalueen sijoittumisen Mollier-diagrammiin. Turbiinin suunnitellussa paisunnassa tulohöyryn lämpötila on 187 °C ja paine on 9,1 bar. Kuvassa 46 on merkitty vihreällä myös faasimuutosalue. Tarkastelemalla turbiinin paisuntakäyrän sijoittumista eroosiokorroosio- ja faasimuutosalueille ja vertaamalla tätä johtosiipikiekkojen vaurioiden sijaintiin, voidaan vaurioiden voimakkuuden todeta olevan yhtenevä Mollier-diagrammiin piirrettyjen alueiden kanssa. Johtosiipikiekoista 2 ja 2a olivat eniten kuluneet. Tämän paisuntakäyrän perusteella 2. jakson johtosiipikiekkojen sijainnin voidaan arvioida olevan vakavan eroosiokorroosion ja faasimuutosalueen kohdalla. Tällä alueella höyryn lämpötila on noin 150 °C ja alhaisen kosteuspitoisuuden vuoksi muodostuneiden pisaroiden pH on alhainen. Muiden johtosiipikiekkojen jakotasojen kulumisen ei ole ollut yhtä voimakasta kuin jaksoissa 2 ja 2a. Turbiinin paisunta sijoittuu kokonaisuudessaan eroosiokorroosion alueelle.

Salmisaaren turbiinin tutkimukset osoittavat, että turbiinin pesä on kärsinyt voimakkaasta eroosiokorroosiosta Vo0:ssa ja Vo1:ssä. Turbiinin pesä on valmistettu eroosiokorroosiolle alttiista hiiliteräksestä. Pesän tutkiminen osoittaa, ettei kyseinen materiaali kestä viimeisten väliottojen eroosiokorroosiota. Johtosiipikiekot 4 ja 4a voidaan katsoa sijaitsevan lähellä samaa kohtaa paisuntakäyrää kuin Vo1. Johtosiipikiekon 4a pystytiivistepinta oli kulunut, mutta muuten kyseiset kiekot olivat säilyneet siedettäväsä kunnossa. Näin ollen voidaan nähdä, että johtosiipikiekot 4 ja 4a sijaitsevat vähemmän materiaalia rasittavalla alueella kuin johtosiipikiekot 2-3a. Pesän voimakkaan altistumisen eroosiokorroosiolle voidaan katsoa johtuvan kovasta höyryn virtausnopeudesta (yli 212 m/s), sekä pesään iskeytyvistä vesikalvoista irronneista vesipisaroista.

Hapen määrän ollessa prosessissa runsas, ei magnetiitti liukene teräksen pinnalta yhtä helposti kuin matalahappisessa prosessissa. Turbiinin peräpäähän on päässyt vuotamaan hapetta ajokauden 2016–2017 aikana, mutta ehyt magnetiitti ei ole pystynyt muodostumaan turbiinin pesän pinnoille paisunnan loppupäissä. Paikoin oli havaittavissa aiemmin kuluneita kohtia, joihin oli muodostunut magnetiittia.

Vaurioiden voimakkuudesta johtuen voidaan todeta, että on syytä tarkastella turbiiniin liittyvää vesikemiaa tarkemmin. Turbiinin kunnon tutkinnan yhteydessä Salmisaaren voimalaitoksen turbiiniin liittyvää vesikemiaa tarkasteltiin. Vesikemian tarkastelussa ei huomattu hälyttäviä puutteita. Välipaineturbiinin yhteydessä ei ole vesikemian mittauksia. Vesikemian tilaa voidaan arvioida tutkimalla kattilasta tulevan höyryn vesikemiaa tai lauhteen tilaa. Eroosiokorroosion määrän minimointi vaatii korkean pH-arvon. Kattilalta tulevan höyryn pH-arvojen tarkasteleminen osoitti arvojen olevan VGB:n asettamien arvojen [20] rajoissa. Koska höyryn pH:n säätämiseen käytetään ammoniakkia, vesipisaroiden pH on välipaineturbiinin alkupäässä alhaisempi kuin höyryn pH. Turbiinin materiaalit tulisi suunnitella kestäämään happamampia olosuhteita.

Turbiinin paisuntakäyrän sijainti riippuu tulohöyryn lämpötilasta ja paineesta, joten ajo-tilanteiden muutokset siirtävät altteimpana olevan kohdan muualle turbiinissa. Vaikka turbiinin loppupää ei paisuntakäyrän mukaan sijoitu vakavalle eroosiokorroosioalueella, on turbiini altistunut eroosiokorroosiolle ja kuluttanut pesän perusainetta huomattavasti. Kuluminen selittyy eroosiokorroosioon yhdistetyllä vesipisaraeroosiolla. Vesipisaroiden kuluttamista on arvioitu seuraavassa kappaleessa.

4.2.2 Vesipisaraeroosio Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa

Kuten aiemmin esitelty, turbiinissa kondensoituvat ensimmäiset pisarat ovat kooltaan pieniä ja kohdistavat tasaisen pisarasumun turbiinin elementteihin. Johtosiipikiekkujen ja muiden staattisten elementtien pinnoille muodostuvilta vesikalvoilta irtoavat pisarat ovat kooltaan homogeenisesti kondensoituneita pisaroita suurempia ja aiheuttavat pieniä pisaroita suuremman voiman myöhempiin komponentteihin höyryvirrassa.

Todellista pisaroiden kokoa tai nopeutta on mahdotonta arvioida, mutta yksinkertaisten mallinnusten avulla pystytään arvioimaan vesipisaroiden turbiinin pinnoille kohdistaman voiman suuruutta. Salmisaaren turbiinista tiedossa on teoreettinen höyryynnopeus, höyryn kosteus, sekä juoksusiipien pituus ja pyörimisnopeus. Höyrynkosteuden noustessa johtosiipien pinnoille muodostuu paksumpia vesikalvoja, minkä seurauksena vesipisaroiden koko ja määrä kasvavat.

Koska todellista pisaroiden kokoa ei ole tiedossa, eikä käytettävissä ole CFD-mallinnusta, tulee pisaroiden koon arviointi tehdä kirjallisuuden tietojen perusteella. Koska pisaroiden koon ja nopeuden laskeminen on tehty käyttäen viitetietojen arvioita,

ei voida saatuja laskennallisia tuloksia pitää varmoina. Laskennallisia teoreettisia tuloksia voidaan verrata empiirisesti tutkittuihin turbiinissa ilmenneisiin vahinkoihin. Yhdistämällä teoreettinen laskenta ja turbiinin vaurioiden analysointi, pystytään arviomaan turbiinin todellinen tilanne ja luomaan päätelmät siitä minkälaisia olosuhteita turbiini kestää ja kuinka kesto pystytään parantamaan.

Pisaroiden aiheuttaman paineen arviointi ei vesivasararelaation mukaan riipu pisaroiden koosta, joten paineen laskemiseksi riittää arvio pisaran nopeudesta. Saatua laskennallista painetta voidaan verrata materiaalin lujuusominaisuuksiin.

Höyryn paineen ollessa 0,2 bar, höyryn lämpötila on 65 °C, veden tiheys on 980 kg/m³[70]. Höyryn nopeus Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin viimeisen jakson kohdalla on 212 m/s [8], jos arvioidaan, että muodostuneet vesipisarot kiihtyvät puoleen höyryn nopeudesta (106 m/s), Cookin vesivasararelaation mukaan:

$$P = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1463 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 106 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 152 \text{ MPa}.$$

Pisaroiden kiihtymistä höyryn virtauksessa voidaan arvioida Gardnerin tutkimusten [53] perusteella. Pienet pisarat (alle 20 µm) kiihtyvät nopeasti lähelle höyrynopeutta, mutta suurten pisaroiden voidaan arvioida kiihtyvän noin puoleen höyryn nopeudesta kuljettuaan höyryvirtauksessa jonkin aikaa. Arvio, että pisarat kiihtyvät puoleen höyryn nopeudesta on hyvä yleistys, kun pisaroiden todellista kokoa ei tiedetä. Höyryn paineen laskeissa vesipisaroiden tiheys pienenee. Pisarat aiheuttavat suuremman iskeytymispaineen alhaisilla höyrynpaineilla.

Heymannin esittämän kaavan (3) mukaan laskettuna vesipisaran aiheuttama paine staattiselle pinnalle on tällöin:

$$P = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1463 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 106 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \left(1 + \frac{2 * 106 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1463 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)$$

$$P = 175 \text{ MPa}.$$

Jos käytetään Mahdipoor ym. esittelemää Heymannin luomaa kaavaa (4), jossa syntyvän paineen arvioinnissa huomioidaan pisaran synnyttämä shokkiaalto, vastaavilla arvoilla saadaan vesipisaran aiheuttamalle paineelle:

$$P = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1463 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 106 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \left(2 + (2 * 2 - 1) * \frac{106 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1463 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)$$

$$P = 338 \text{ MPa}.$$

Kaavan (4) mukaan vesipisaran aiheuttama paine olisi lähes kaksinkertainen shokkiaallottomaan paineeseen nähden. Koska Heymannin esittämiä kaavoja on tutkittu empiirisesti ja niitä on käytetty muiden vesipisaroiden aiheuttamien painelaskujen lähtökohtana, arvioita voidaan pitää verrattain luotettavina.

Pisaran suhteellinen nopeus juoksusiiven kärkeen nähden riippuu pisaran iskeytymiskulmasta, samoin pisaran materiaaliin aiheuttama paine. Pisaran suhteellinen nopeus on alhaisempi kuin siiven kärjen nopeus. Jos materiaalien kesto arvioidessa käytetään oletusta, että pisarat osuvat siiven kärkeen kohtisuorasti siivenkärjen nopeudella saadaan arvio, kuinka paljon materiaalin tarvitsee ääritilanteessa kestää. Jos ääritilanteen arvioinnissa käytetään pisaran shokkiaallon huomioivaa yhtälöä (4), saadut arvot kuvaavat vain erittäin pientä osaa siipien kärkiin iskeytyvistä pisaroista. Olettaen, että syntyvä shokkiaalto ja pisaran todellisen iskeytymisnopeuden ero kohtisuoraan nopeuteen verrattuna kumoaisivat toisensa, Heymannin esittämää Cookin vesivasararelaation laajennettua versiota (kaava (3)) voidaan käyttää arvioinnissa oletuksella, että pisarat iskeytyvät siiven kärkeen kohtisuorassa siiven kärjen kehänopeudella.

Kierrostaajuudella 3000 rpm viimeisen siiven kärjen nopeus on 344 m/s. Heymannin esittämällä kaavalla (3) siiven kärkeen vesipisaroiden aiheuttamaksi paineeksi saadaan

$$P = 980 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1463 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 344 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \left(1 + \frac{2 * 344 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1463 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)$$

$$P = 727 \text{ MPa}.$$

Jakson 4a juoksusiiven kärjen nopeus kierrostaajuuden ollessa 3000 rpm on 303 m/s. Paineen ollessa 0,5 bar, veden tiheys on 970 kg/m³. Jos ei oteta huomioon höyryn liikettä, jaksen 4a juoksusiipien kärkeen kohdistuma vesipisaran aiheuttama paine on tällöin

$$P = 970 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1463 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 303 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \left(1 + \frac{2 * 303 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1463 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)$$

$$P = 608 \text{ MPa}.$$

Taulukossa 6 on esitelty pisaran aiheuttamat paineet kunkin juoksusiiven kärkeen, käyttäen oletusta, että pisara iskeytyy siiven kärkeen kohtisuorasti siiven kärjen pyörimisnopeudella. Taulukon arvot on laskettu kaavalla, joka ei ota huomioon shokkiaallon materiaaliin aiheuttamaa maksimipainetta. Vaikka taulukossa on esitetty ensimmäisten jaksien paineet, jaksien kohdalla ei normaalissa ajotilanteessa ilmene eroosiota aiheuttavia vesipisaroita.

Taulukko 6. *Pisaran aiheuttama paine juoksusiipien kärkeen kierrostaajuuden ollessa 3000 rpm ja esimerkkipaineilla.*

Juoksusiipi	Paine (bar)	Veden tiheys (kg/m ³)	Siiven kärjen nopeus (m/s)	Pisaran aiheuttama paine siiven kärkeen (MPa)
1	5	917	257	466
1a	5	917	255	461
2	4	925	263	484
2a	3	934	269	502
3	1,7	946	264	497
3a	1,3	952	295	577
4	0,7	965	287	564
4a	0,5	970	303	608
5a	0,2	980	344	727

Syntyvää painetta voidaan verrata turbiinin materiaalien myötölujuuteen. Myötölujuuden arvo ilmoittaa, kuinka suuren voiman materiaali tarvitsee plastisen muodonmuutoksen aikaansaamiseksi. Materiaalien ominaisuuksista kovuuden on todettu korreloivan parhaiten materiaalien eroosionkeston kanssa. Metallien kovuuden ja murtolujuuden välillä on todettu olevan riippuvuus. Voidaan arvioida, että metallien murtolujuus saadaan kertomalla kovuus (Brinelleinä) arvolla 3,5 [71]. Materiaalin myötölujuuden ja pisaran aiheuttaman paineen vertaaminen ei kerro suoranaisesti materiaalien vesipisaraeroosion kestosta, mutta auttaa hahmottamaan paineen suuruusluokkaa. Jos paine ylittää materiaalin murtolujuuden, on erittäin todennäköistä, että iskeytyvät pisarat aiheuttavat vahinkoa materiaalissa.

Juoksusiipien (pl. viimeiset juoksusiivet) teräslaadun 1.4006 (X12Cr13) $R_{p0,2}$ (0,2 % myötölujuus) on noin 480 MPa [72] ja viimeisten juoksusiipien materiaalin 1.4923 (X22CrMoV12-1) $R_{p0,2}$ on noin 600 MPa [73]. Juoksusiipien lisäksi jälkiä vesipisaraeroosiosta voitiin havaita johtosiipikiekoissa ja turbiinin pesässä. Teräslaadun S235JR myötölujuus on noin 235 MPa ja S355J0 noin 355 MPa.

Koska pelkkää pisaran materiaaliin aiheuttamaa painetta tutkimalla ei voida tehdä pitkälle vietyjä johtopäätöksiä materiaalien vesipisaraeroosion kestosta, on syytä tutkia tilannetta käyttäen eroosioastetta määrittäviä kaavoja. Juoksusiipien yksinkertaistettu vesipisaraeroosion vertailuarvo saadaan Hitachin kehittämästä kaavasta (6). Kosteuspitoisuuden ollessa 10 % vesipisaraeroosion vertailuarvolle saadaan arvoksi

$$E = 4,3 * \left(0,01 * 344 \frac{m}{s} - 2,44 \right)^2 * 10^{0,8}$$

$$E = 27,1.$$

Taulukossa 7 on esitetty vesipisaraeroosion vertailuarvot eri kosteuspitoisuuksilla. Kosteuspitoisuudet on määritetty KLV1:n paineiden mukaan tulohöyryn lämpötilan ollessa 200 °C ja paineen 9 bar.

Taulukko 7. Salmisaaren vp-turbiinin viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvo Hitachin kaavan (6) mukaan, tulohöyryn ollessa 200 °C ja 9 bar.

KLVI:n vastapaine (bar)	Vo0 kosteus (%)	Vesipisaraeroosion vertailuarvo
0,2	13,5	34,5
0,25	13	33,5
0,31	12	31,4
0,39	11	29,3
0,47	10	27,1

Tämän mukaan viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosio olisi kohtalaisissa rajoissa, jos tilanteessa pätee $E < 4$, eli kosteuspitoisuus tulisi olla pienempi kuin

$$y = \sqrt[0,8]{\frac{4}{4,3 * \left(0,01 * 344 \frac{m}{s} - 2,44\right)^2}}$$

$$y = 0,91 \text{ \%}.$$

Saatu arvo on erittäin pieni, mikä saa epäilemään kaavan tai raja-arvojen paikkaansa pitävyyttä. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin loppupään vesipisaraeroosion määrä ei vastaa kirjallisuuden raja-arvoja. Kirjallisuudessa esitettyjen raja-arvojen ei voida katsoa soveltuvan tähän tutkimukseen. Laskettuja arvoja voidaan käyttää eri tilanteita vertaavissa arvioinneissa, vaikka saadut raja-arvot poikkeavat kirjallisuudessa esitetyistä arvoista.

Kaavassa (7) esiteltiin juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvo (E), joka ottaa huomioon höyryn paineen. Tämän esitetyn vertailuarvon avulla voidaan arvioida kosteuden nousun vaikutusta eroosion määrään juoksusiivissä. Kosteuden ollessa 10 % viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvo on:

$$E = 0,1^2 * \left(344 \frac{m}{s}\right)^3 * \frac{K}{p_0}$$

$$E = 407076 \frac{m^3}{s^3} * \frac{K}{p_0}.$$

Kun turbiinin loppupään paine laskee, pisaroiden tiheys sekä höyryn nopeus kasvavat ja turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvo nousee. Näistä laskuista voidaan huomata, että jo prosenttiyksikön kosteuden nousu nostaa merkittävästi juoksusiipien eroosion vertailuarvoa.

Aktioturbiinissa höyryn paisunta tapahtuu johtosiivissä ja näin ollen juoksusiipien yli ei ole paine-eroa. Tämä tarkoittaa, että kosteus ennen viimeisiä juoksusiipiä on vähintään sama kuin vastaavan välion kosteus. [8] Osa kosteudesta saattaa höyrystyä uudelleen viimeisten juoksusiipien pinnalta.

Kun välipaineturbiinin tulohöyry on 200 °C ja 9 bar, turbiinin Vo0:n kosteuspitoisuudet ja viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvot on esitetty Taulukossa 8. Taulukkoon lasketut vertailuarvot on laskettu käyttäen kosteuspitoisuutta niin, että 1 on 100 % ja paine on ilmoitettu Pascaleina (1 bar = 100000 Pa). Koska K on turbiinikohmainen vakio, vertaillessa Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tilannetta erilaisilla höyryn arvoilla, ei vakiota K tarvitse määrittää.

Taulukko 8. *Turbiinin kosteudet ja viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvot eri kaukolämmön paluuveden lämpötiloilla, tulohöyryn arvoilla 200 °C ja 9 bar.*

Kaukolämpöveden paluu- veden lämpötila (°C)	Vo0 paine (bar)	Vo0 kosteus (%)	Vesipisaraeroosion vertailuarvo
40	0,2	13,5	37,09*K
45	0,25	13	27,52*K
50	0,31	12	18,91*K
55	0,39	11	12,63*K
60	0,47	10	8,66*K

Kirjallisuudesta löytyvien vertailuarvojen ja kaavioiden perusteella [11; 18; 32], voidaan arvioida vesipisaraeroosion sijaintia Mollier-diagrammissa. Salmisaaren turbiinin kunnan tarkastelun perusteella voidaan paikantaa alueet, joissa on merkkejä vesipisaraeroosiosta. Vertaamalla Salmisaaren turbiinin historian prosessidataa voidaan määrittää, että Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin viimeinen jakso liikkuu vesipisaraeroosion kannalta riskialueella, kun $E \geq 10 * K$. Valitaan näin vesipisaraeroosion raja-arvoksi $10 * K$. Raja-arvot kosteuspitoisuudelle voidaan laskea muuttamalla kaava (7) muotoon

$$y \geq \sqrt{\frac{10 * K * p}{v^3}}. \quad (17)$$

Kaavan (17) perusteella lasketut raja-arvot vesipisaraeroosiolle on koottu Taulukkoon 9.

Taulukko 9. *Vesipisaraeroosion kosteuden raja-arvot eri paineilla.*

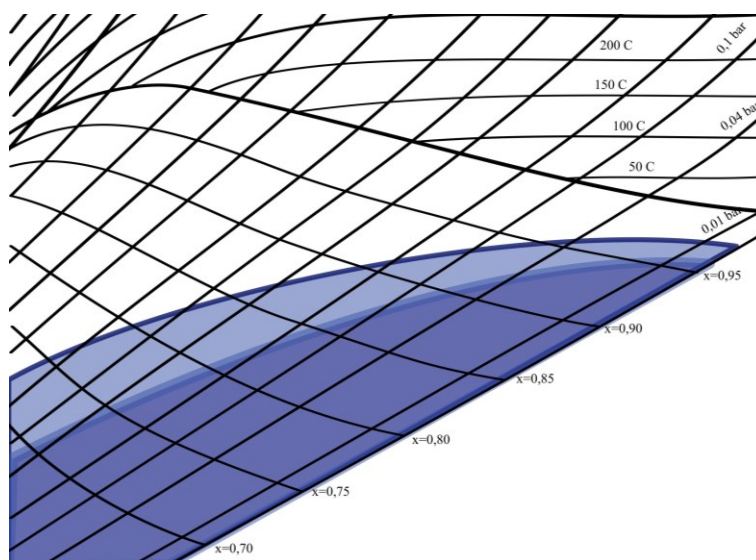
p [bar]	0,01	0,04	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3
y	0,016	0,031	0,05	0,07	0,085	0,11	0,16	0,22	0,27

Tiedetään, että pienillä paineilla ja korkeilla kosteuspitoisuuksilla vesipisaraeroosio on voimakkaampaa kuin korkeilla höyryn paineilla [53]. Valitaan voimakkaan vesipisaraeroosion rajaksi 50*K, eli viisi kertaa voimakkaampi eroosio kuin aiemmin määritetty vesipisaraeroosion raja. Voimakkaan vesipisaraeroosion rajan määrittämiseksi Taulukkoon 10 on laskettu höyryn paineita vastaavat kosteuspitoisuudet, joilla vesipisaraeroosion vertailu arvo on 50*K.

Taulukko 10. Voimakkaan vesipisaraeroosion kosteuden raja-arvot eri paineilla.

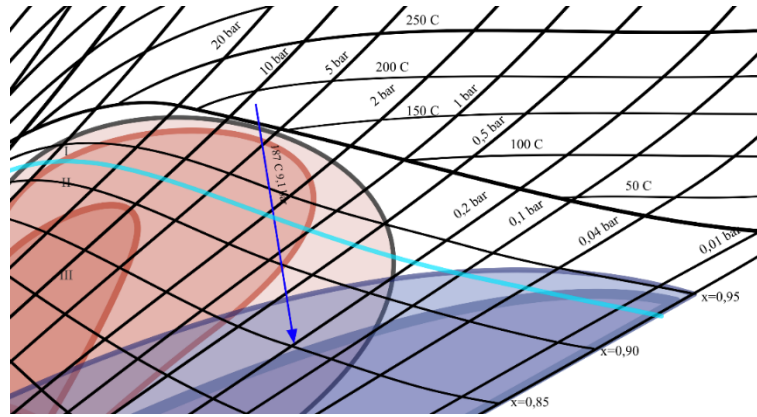
p [bar]	0,01	0,04	0,1	0,2	0,3	0,5	1
y	0,035	0,07	0,11	0,157	0,19	0,24	0,35

Piirtämällä Taulukkoon 9 ja Taulukkoon 10 laskettujen arvojen mukaan käyrät Mollier-diagrammiin, saadaan Kuvassa 47 esitetyt vesipisaraeroosion alueet.



Kuva 47. Määritetty vesipisaraeroosion alue: ylempi käyrä rajaa lievän ja alempi voimakkaan vesipisaraeroosion alueen.

Pienimmillä paineilla vesipisaraeroosion raja-arvo määrittyy erittäin pienille kosteuspitoisuuksille, joissa vesipisaroiden määrä on hyvin vähäinen. Näillä alueilla voidaan arvioida mahdollisesti näkyvän pieniä vaikutuksia vesipisaroiden iskeytymisestä, mutta kosteuspitoisuuden ollessa alle 5 % vaurioiden todennäköisyys on erittäin vähäinen. Näinpä Kuvaan 47 määritettyjä vesipisaraeroosion alueita voidaan asettaa alkamaan vasta kosteuspitoisuuden ollessa yli 5 %.



Kuva 48. SaB vp-turbiinin paisuntakäyrän sijoittuminen eroosioroosion ja vesipisaraeroosion alueille, tulohöyryn arvoilla 187 °C ja 9,1 bar, kaukolämmön paluuveden ollessa 40 °C; vaaleansininen osoittaa 7 % kosteuden rajan.

Kuva 48 osoittaa SaB vp-turbiinin suunnitellun paisunnan Mollier-diagrammissa määritettyjen eroosioroosion ja vesipisaraeroosion alueille. Tulohöyryn lämpötilan ollessa 187 °C ja paineen 9,1 bar, vesipisaraeroosiota alkaa esiintyä turbiinin loppupäässä, kun Vo0:n vastapaine on alle 0,45 bar. Vastapaineen arvolla 0,45 bar, kaukolämmön paluuveden lämpötila on noin 58 °C. Prosessidatan tarkastelu osoittaa, että kaukolämmön paluuveden lämpötila vaihtelee pääsääntöisesti välillä 40–50 °C. Jos kaukolämmön paluuveden lämpötila laskee alle 38 °C (vastapaine tällöin noin 0,18 bar), voidaan turbiinin viimeisen jakson katsoa sijoittuvan voimakkaan vesipisaraeroosion alueelle.

Kaukolämmön menoveden lämpötilan ollessa 90 °C höyry paisuu Vo1:ssä 0,7 bariin. Kuvassa 48 esitetty paisuntakäyrä ja vesipisaraeroosion alue eivät kohtaa, jos höyry ei paisu 0,3 bariin asti. Vaikka vesipisaraeroosion riskialue ei jatku tällä paisunnalla yli 0,3 bariin, ei voida poissulkea vesipisaraeroosion olemassa oloa korkeilla kosteuspitoisuuksilla. Kosteuspitoisuuden ollessa yli 7 % voidaan katsoa, että turbiinin pinnoille höyrystymästä muodostuneista vesikalvoista irtoaa suurempia pisaroita, jotka voivat aiheuttaa vesipisaraeroosiota. Pienillä paineilla vesipisarot kasvavat herkemmin isomman kokoisiksi ja kiihtyvät korkeampiin nopeuksiin kuin vesipisarot korkeammissa paineissa, joten pienillä paineilla vesikalvoista irronneiden pisaroiden vaikutus turbiinin pintoihin on suurempi; kuitenkin Kuvassa 48 esitettyjen riskialueiden lisäksi on aina syytä tarkastella höyryn kosteutta.

Tilanne jokaisen turbiinin kohdalla on yksilöllinen, mutta Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tutkimusten tulosten ja kirjallisuuden datan [11; 18; 32] vertailemisen perusteella voidaan todeta, että määritettyä vesipisaraeroosion aluetta voidaan käyttää tarkastellessa muitakin turbiineja.

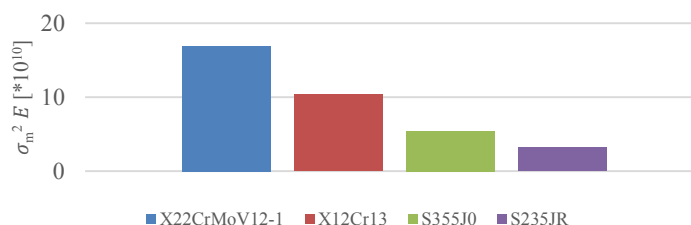
Kaavan (12) ($Re^{-1} \propto \sigma_m^2 E$) mukaan eroosioaste riippuu materiaalin murtolujuudesta ja kimmomoduulista kääntäen verrannollisesti. Viimeisten juoksusiipien materiaalille X22CrMoV12-1 $\sigma_m = \sim 900 \text{ N/mm}^2$ [66] ja 100 °C:ssa $E = \sim 209000 \text{ MPa}$ [50]. Muiden juoksusiipien ja johtosiipien materiaalin X12Cr13 $\sigma_m = \sim 700 \text{ N/mm}^2$ [66] ja 100 °C:ssa

$E \approx 212000$ MPa [50]. Johtosiipikiekkojen ja pesän materiaalille S355J0 $\sigma_m = \sim 520$ MPa [50] ja $E \approx 200000$ MPa [74]. Pesän ja väliottojen materiaalin S235JR $\sigma_m = \sim 400$ MPa [50] ja $E \approx 200000$ MPa [75]. Kaavalla (12) laskettuna saadaan Taulukkoon 11 arvot.

Taulukko 11. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin materiaalien vesipisaraeroosion kestoja määrittävät tekijät.

Materiaali	X22CrMoV12-1	X12Cr13	S355J0	S235JR
$\sigma_m^2 E$	$16,9 \times 10^{10}$	$10,4 \times 10^{10}$	$5,41 \times 10^{10}$	$3,20 \times 10^{10}$

Materiaalit, joilla on Taulukossa 11 isoimmat arvot, kestävät vesipisaraeroosiota parhaiten.



Kuva 49. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinien vesipisaraeroosion kesto (Taulukon 11 arvot).

Taulukon 11 arvot on esitetty Kuvassa 49. Laskettujen arvojen perusteella siipien materiaalit kestävät puhdasta vesipisaraeroosiota paremmin kuin johtosiipikiekkojen ja pesän materiaalit. Viimeisen juoksusiipijakson materiaalien vesipisaraeroosion kesto on näiden arvojen mukaan jonkin verran parempi kuin muiden juoksusiipien materiaalit.

Kun tiedetään arvio iskeytyvien pisaroiden halkaisijasta, voidaan laskea ASTM:n tutkimusohjelmassa selvitetty vesipisaraeroosion aste kaavalla (16), eli $\log R_e = 4,8 \log V - \log NER - 16,65 + 0,67 \log d + 0,57J - 0,22K$. Hiiliteräksen NER-arvo vaihtelee kovuudesta riippuen välillä 0,18–0,6 (kovuus 110–190 HV) ja martensiittisen ruostumattoman teräksen arvo välillä 0,6–3 (kovuus 200–400 HV) [16]. S355J0 kovuuksi on mitattu noin 140 HV, eli sen NER-arvo on noin 0,3. S235JR kovuus on noin 115 HV ja NER arvo noin 0,2. Siipien X12Cr13 teräksen kovuuksi on mitattu noin 200 HV, eli sen NER-arvo on noin 0,6. Viimeisten juoksusiipien teräksen X22CrMoV12-1 kovuus on noin 260 HV [76] ja NER-arvo siten noin 1.

Homogenisesti kondensoituneiden pisaroiden kokoa voidaan arvioida Gardnerin esittämällä kaavalla (1). Arvioidaan pisaran kasvua 0,2 m matkalla. Turbiinin viimeisen jakson kohdalla höyryn nopeudella 212 m/s höyryltä kestää 0,2 m kulkemiseen

$$t = \frac{0,2 \text{ m}}{212 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 9,4 * 10^{-4}.$$

Jos arvioidaan, että pisara kasvaa tällä matkalla 10 %. Voidaan laskea kaavalla (1) pisan kooksi tarkasteluhetkellä 74 °C, höyrystymislämmön arvolla 2258,3 kJ/kg [77], höyryn lämmönjohtavuuden arvolla 0,022 W/mK (=0,022 J/smK) [78], veden pintajännityksen arvolla 0,065 N/m [79] ja veden tiheyden arvolla 968 kg/m³

$$d = \sqrt[3]{9,4 * 10^{-4} \text{ s} * \frac{16 * 0,022 \frac{\text{J}}{\text{smK}} * 0,065 \frac{\text{N}}{\text{m}} * 347,15 \text{ K}}{(2,2583 \frac{\text{J}}{\text{kg}})^2 * \left(968 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^2 * 0,1}} = 0,25 * 10^{-6} \text{ m}$$

$$= 0,25 \text{ } \mu\text{m}.$$

Jos käytetään arviota, että vastaavasti pisan kasvu kyseisellä 0,2 m matkalla olisi 1 %, saadaan pisan halkaisijaksi:

$$d = 0,54 \text{ } \mu\text{m}.$$

Näin pienten pisanoiden ei ole todettu aiheuttavan eroosiota, joten homogeenisesti muodostuneiden pisanoiden tarkasteleminen ei ole oleellista.

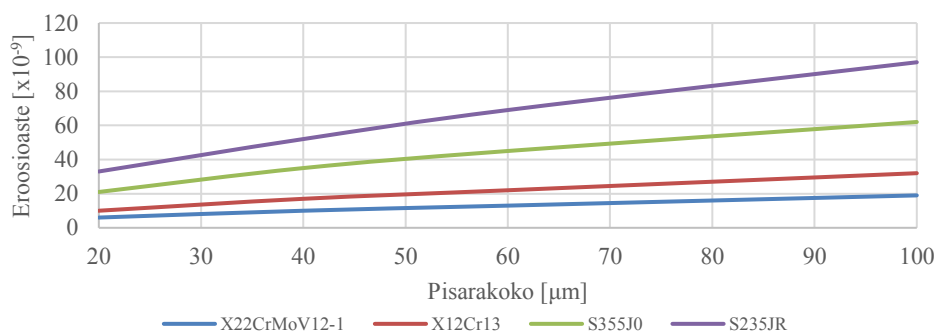
Koska pisanoiden syntyminen ja kasvu eivät tapahdu turbiinissa homogeenisesti, pisanoiden todellinen koko on mahdotonta määrittää. Lämpötilan noustessa veden pintajännitys kasvaa ja tiheys pienenee. Turbiinin pinnoille muodostuneista vesikalvoista irtoavien pisanoiden kokoa voidaan arvioida kirjallisuuden tiedon perusteella. Johtosiiviltä irtoavat pisarat ovat kooltaan todennäköisesti väliltä 20–100 μm [53; 80].

Laskemalla kaavalla (16) vesipisaraeroosion asteeksi eri pisan koilla, kun J=1, K=0 ja pisan iskeytymisnopeus 200 m/s saadaan Taulukon 12 arvot vesipisaraeroosioasteelle.

Taulukko 12. *Materiaalien pisaraeroosion arvot erikokoisilla pisaroilla, kun J=1, K=1 ja pisan iskeytymisnopeus 200 m/s.*

Materiaali Pisarakoko	X22CrMoV12-1	X12Cr13	S355J0	S235JR
20 μm	6x10 ⁻⁹	10x10 ⁻⁹	21x10 ⁻⁹	33 x10 ⁻⁹
40 μm	10x10 ⁻⁹	17x10 ⁻⁹	35x10 ⁻⁹	52 x10 ⁻⁹
60 μm	13x10 ⁻⁹	22x10 ⁻⁹	45x10 ⁻⁹	69 x10 ⁻⁹
100 μm	19x10 ⁻⁹	32x10 ⁻⁹	62x10 ⁻⁹	97 x10 ⁻⁹

Taulukossa 12 on käytetty vesipisaran iskeytymisnopeutena 200 m/s kuvaamaan siiven kärkeen tai staattisille pinnoille kohdistuvien pisaraniskujen keskiarvotilannetta. Suuremmilla nopeuksilla eroosioaste kasvaa ja vastaavasti pienillä nopeuksilla pienenee.



Kuva 50. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin eri materiaalien vesipisaraeroosion aste erikokoisilla pisaroilla (Taulukon 12 arvot).

Taulukon 12 arvot on esitetty kuvaajana Kuvassa 50. Taulukon arvojen voidaan todeta olevan materiaalien kulumisen suhteen vastaavia aiemmin murtolujuuden ja kimmomoduulin suhteen laskettuihin arvoihin verrattuna.

4.3 Tehdyt korjaustoimenpiteet vuonna 2017

Kevään 2017 aikana turbiinille kesällä tehtävien korjaustoimenpiteiden tarve arvioitiin tarkasti. Kesän 2017 jälkeen turbiinin välipainepesä on suunniteltu avattavaksi ja huollettavaksi seuraavan kerran samaan aikaan korkeapainepesän kanssa vuosihuollossa 2022. Kesällä 2017 tehtyjen toimenpiteiden tulee varmistaa turbiinin kunto ennen seuraavaa avausta.

Kuten todettu kappaleessa 4.2.1, Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin välipainepesän paisuntakäyrä sijoittuu kokonaisuudessaan eroosiokorroosion alueelle ja suuri osa vakavan eroosiokorroosion alueella. Alkupää turbiinista sijoittuu faasimuutosalueelle, missä höyryn kuluttava vaikutus on alhaisen pH:n vuoksi suurempi. Turbiininolosuhteet huomioon ottaen voidaan arvioida, että kesän 2017 aikana tehtävien korjaus- ja suojaustoimenpiteiden lisäksi on syytä valmistautua seuraavan huollon yhteydessä tehtäviin toimenpiteisiin.

Johtosiipiekkojen ja -kannakkeiden jakotasojen korjauksen jälkeen tulee varmistaa, että pinnan epä johdonmukaisuudet on minimoitu. Pienetkin naarmut pinnassa voivat toimia eroosion keskittymänä, jos pinnat eivät ole riittävän tiiviisti yhdessä.

4.3.1 Pinnoitus

Höyryturbiini voidaan suojata eroosiokorroosiolta pinnoitteen avulla. Osana tätä diplomityötä tavoitteena oli arvioida turbiinin pinnoitustarvetta ja löytää tarvittaessa sopiva

pinnoite. Kevään 2017 aikana pinnoitusyritysten kanssa käytiin neuvotteluja pinnoitusvaihtoehtoista ja pohdittiin, onko turbiinin pinnoittaminen kannattava korjaustoimenpide.

Turbiinin pesä on ollut käytössä kolme vuotta, joten eroosiokorroosio ja pisaraeroosio eivät ole aiheuttaneet suuria materiaalivahinkoja. Näin ollen pesän pinnoittaminen tässä vaiheessa toimii ennalta ehkäisevänä toimenpiteenä. Pesän perusaineeksi valittu hiiliteräs kuluu kostean höyryn vaikutuksesta. Kulumisen nopeus on riippuvaista vesikemiasta sekä turbiinin ajotavasta. Turbiinin pesän pinnoittamatta jättämisestä seuraisi materiaalin kulumisen jatkuminen. Jos turbiinia ei pinnoitettaisi kesällä 2017, olisi toimenpide ajankohtainen seuraavan huollon aikana, viimeistään vuonna 2022 korkeapainepesän huollon yhteydessä. Turbiinin pesä päätettiin pinnoittaa kesän 2017 aikana, koska pinnoituksen siirtäminen seuraavaan turbiinihuoltoon, tekisi pinnoitusprosessista työläämän korjaustoimenpiteiden lisääntyessä.

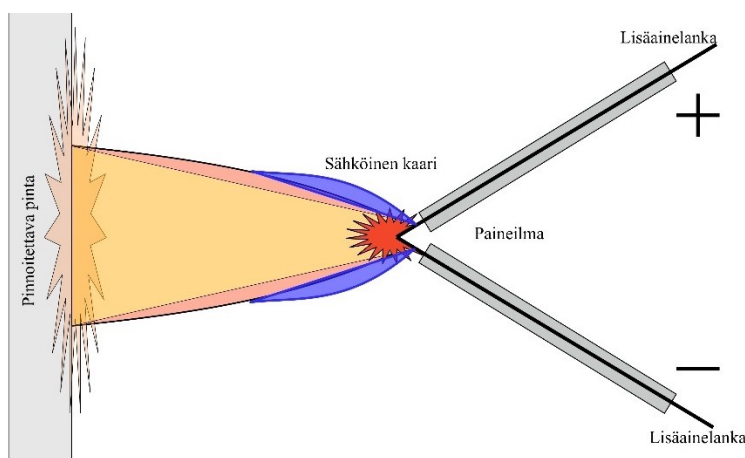
Pinnoitteen tarkoituksena on suojata turbiinin pesä eroosiokorroosiolta ja vesipisaraeroosiolta. Pinnoittamalla pesä yli 12 % kromia sisältävällä rautaseoksella pesän eroosiokorroosio voidaan lähes täysin eliminoida [32]. Koska turbiinin loppupäässä höyrynkosteus saattaa nousta korkeaksi, tulee pinnoitteen reagointi vesipisaroiden iskeytymiseen huomioida. Vesipisaraeroosion välttämiseksi pinnoitteen kovuuden tulee olla riittävän korkea ja pinnanlaadun mahdollisimman tasainen. Kova pinnoite ottaa vastaan pisaroiden iskeytymisestä johtuvan energian paremmin kuin alhaisen kovuuden omaava metalli. Jos pinnankarheus on suuri, saattaa pisaroiden iskeytymisestä seuraava pinnan myötäinen korkeanopeuksinen virtaus lohkaista pinnoitteen.

Tärkeää on myös huomioida pinnoitteen tartunta. Jos pinnoitteen adheesio pohjametalliin ei ole riittävä, voi pinnoite lohkeilla höyryvirtauksen aiheuttaman voiman seurauksena. Riski pinnoitteen lohkeilusta kasvaa kovuuden nousun myötä, sillä kova metalli ei absorboi pisan iskun energiaa, vaan iskun energia voi irrottaa pinnoitteen perusaineesta. Pinnoitteen paksuus on merkitsevää pinnoitteen kestävyydelle. Pinnoitteen tulee olla ohut, sillä kovan pinnoitteen ollessa paksu, lohkeilun riski kasvaa. Hyvin kiinnittyvä ja kestävä pinnoitus saattaa kuitenkin kulua ajan myötä. Tämän vuoksi pinnoitteen olisi suotava olla ominaisuuksiltaan sellainen, että sitä voidaan korjata pinnoittamalla kulu-neita kohtia poistamatta jäljellä olevaa pinnoitetta.

Mahdollisia pinnoitukseen käytettäviä menetelmiä on useita. Toimivia ratkaisuita turbiinin pesän pinnoitukseen voisivat olla HVOF-, plasmaruiskutettavat sekä hitsauspinnoitteet. Pinnoitusyritysten edustajat suosivat turbiinipesien pinnoittamiseen perinteisiä kaariruiskutettavia pinnoitteita; muita menetelmiä on mahdollista käyttää paikallisesti. Kaariruiskutusmenetelmä soveltuu hyvin laajojen alueiden pinnoitukseen. Kaariruiskutettavalla pinnoitteella on mahdollista luoda tasaisia pinnoituksia muita menetelmiä nopeammin. Ruiskutus voidaan tehdä myös ahtaissa paikoissa, sillä kaariruiskutuksen ruiskutusetaisyys on pieni ja ruiskutuspistooli mahtuu pieniin tiloihin, toisin kuin esi-

merkiksi HVOF-menetelmä vaatii 0,8 m tilan ruiskutuspistoolin suuren koon vuoksi [81].

Eri pinnoitteita ja pinnoitusmenetelmiä arvioitaessa pinnoitusyritysten kokemuksen perusteella pinnoitteeksi suositeltiin kaariruiskutettavaa termistä pinnoitetta. Kaariruiskutuksella päästään pinnoittamaan suhteellisen pieniltä etäisyyksiltä. Kuvassa 51 on esitetty kaariruiskutuspistooli. Kaariruiskutuspistooliin tuodaan kaksi pinnoitusainelankaa, joista toinen toimii anodina ja toinen katodina. Langat osuvat yhteen pyssyn päässä ja luovat sähköisen kaaren sulattaen langat 6000 °C:ssa. Sula pinnoitemetalli ruiskutetaan pinnoitettavaan kohteeseen paineilman avulla 240 m/s nopeudella [82]. Paineilmaa ja lisäainelankoihin tuotavan virran määrää voidaan säätää. Hyvä pinnanlaatu vaatii optimaaliset säädöt.



Kuva 51. Kaariruiskutuspistoolin periaate.

Pinnoitustekniikan lisäksi pinnoitusta edeltävät pohjatyöt ovat oleellinen osa pinnoitusprosessia. Pohjatöiden laatu vaikuttaa merkittävästi pinnoituksen tartuntaan. Ennen pinnoitusta turbiinin pinnoilta tulee hioa pois muodostunut magnetiitti. Pinnat tulee hiekkapuhalttaa, jonka jälkeen pinnoitettaville alueille tulee tehdä laajat NDT-tarkastukset pintavirheiden varalta. Mahdolliset säröt ja huokokset tulee paikata hitsaamalla. Jos turbiinin pesään jää epäjatkuvuuskohtia, saattaa niiden pinnoittaminen olla mahdotonta, näin ollen esimerkiksi pesän tukitankojen liitoksia saatetaan joutua täytehitsaamaan ennen pinnoittamista. Ennen pinnoitteen ruiskuttamista pinnoitettavat pinnat puhalletaan esimerkiksi alumiinioksidilla. Puhallus tulee suorittaa juuri ennen pinnoitteen ruiskuttamista; puhallettu pinta alkaa ruostua, jos pinnoitetta ei päästä heti ruiskuttamaan.

Pinnoitteeksi valittiin Telatekin TE-22 kaariruiskutettava kromia ja alumiinia sisältävä rautaseos (Cr 22 %, Al 5 %). Telatekillä on pitkä kokemus TE-22 -pinnoitteen käytöstä erilaisissa väli- ja matalapaineturbiineissa. Telatekin mukaan pinnoite on ollut turbiineissa erittäin hyvä ja pitkäkestoinen. Valittua TE-22 pinnoitetta on tutkittu yhteistyössä VTT:n kanssa ja sen korroosionkeston on todettu olevan hyvä. Pinnoitteen tartuntalu-

juus on 40–60 MPa ja sen kovuus 260–300 HV. Pinnoitteen korkea kromipitoisuus toimii hyvin ehkäisemään turbiinin pesässä tapahtuvaa korroosiota. [81]

Vaikka pinnoitteen kovuus on korkea, Telatek on todennut, ettei TE-22 ole kestänyt montaa vuotta lauhdeturbiinien diffuusorien lippoihin kohdistuvaa pisaraeroosiota [81]. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa kosteuden määrä ei nouse yhtä korkealle, eikä turbiini siten joudu yhtä suuren rasituksen alle kuin lauhdeturbiinit. Turbiinin diffuusoreita voidaan tarkkailla endoskooppien avulla, jolloin nähdään, kuinka pinnoite on noilla alueilla pysynyt. Jos pinnoite ei kestä diffuusoreihin kohdistuvia pisaroiden iskuja, niiden suojaamiseksi voidaan käyttää esimerkiksi stelliitti 21:ä [81]. Diffuusorin merkitys Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin toimintaan ja turbiinista saatavaan sähkötehoon on vähäinen, joten jos pinnoite ei diffuuroreissa kestä, kestävän pinnoitteen löytämisen sijaan, diffuusorien voisi antaa olla sellaisenaan.

Pinnoituksesta saatavan taloudellisen hyödyn arvioiminen on haastavaa, sillä on käytännössä mahdotonta arvioida, mikä turbiinin välipainepesän tila seuraavan turbiinihuollon yhteydessä olisi, jos turbiinia ei vuonna olisi kesällä 2017 pinnoitettu. Silloin odotettavissa olisi ollut korjaushitsauksia erityisesti paikoissa, joissa höyryn virtaus on pyörteilevää, sekä paikoissa, joihin kohdistuu suurin vesipisaroiden voima.

Seuraavan vuosihuollon aikaan pesän pinnoituksen tila tulee tarkastaa turbiinin luukuista. Jos pinnoitus on lohkeillut, se tulee korjata seuraavan huollon yhteydessä. Jos pinnoituksen pohjatyöt ja ruiskutus on tehty asianmukaisesti, pinnoituksen pitäisi pysyä kiinni ja suojata pesää kulumiselta. Vesipisaroiden turbiinin loppupäähän kohdistama voima voi kuluttaa pinnoitetta. Valittu pinnoitetyyppi mahdollistaa kuluneen pinnoitteen korjaamisen ilman vanhan pinnoitteen poistamista.

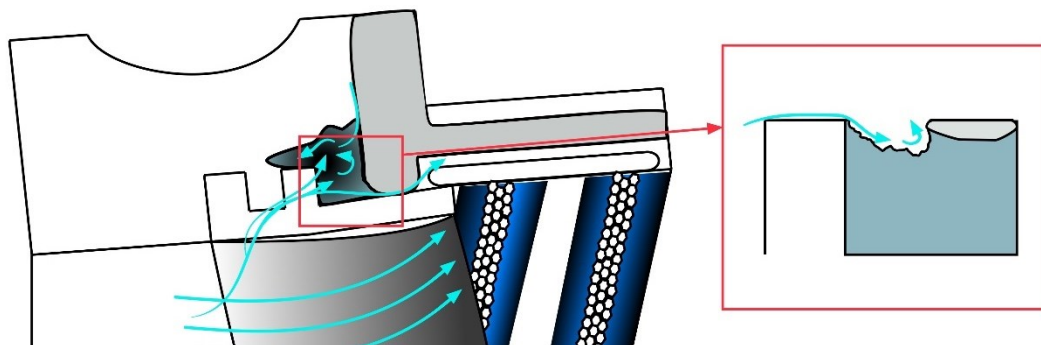
4.3.2 Johtosiipikiekkojen korjaus

Jo ennen turbiinin avaamista johtosiipikiekkojen jakotasot päätettiin korjata. Turbiinin avauksen yhteydessä johtosiipikiekkojen todellinen tilanne nähtiin ja todettiin, että kiekkojen kulumisen oli ennalta arveltua laajempaa. Jakotasojen lisäksi korjausta vaativat kiekkojen pystytiivistepinnat, kiekon perusmateriaali johtosiipien juurien vierestä ja kahden kiekon hunajakennotiivisteen viereiset alueet. Osana tätä diplomityötä yhdessä Skodan ja Telatekin kanssa suunniteltiin korjaukset, joiden tarkoitus on parantaa johtosiipikiekkojen kestoja haastavaksi todetulla turbiinin paisunnan alueella.

Johtosiipikiekot on valmistettu vastaavasta hiiliteräksestä kuin osa turbiinin pesästä. Johtosiipikiekkojen kulumisen on kohdistunut erityisesti jakotasojen kohtiin, joissa hiiliteräs ja siipien ruostumaton teräs tai aiemmat korjaushitsaukset ovat vierekkäin. Ilman kiekkojen pinnoittamista tai muuta korjaustoimenpidettä, on riski, että kiekot kuluvat siipien ympäriltä ja siipien kiinnitys löystyy ja pahimmassa tapauksessa siipiä irtoaa. Riski johtosiipien irtoamiseen on kuitenkin äärimmäisen pieni. Suurempi todennäköi-

syys on, että metallin kulumisen aiheuttaa höyryn läpivuotoja. Johtosiipikeikkojen jakotasojen kulumisen seurauksena höyry saattaa kuluttaa jakotasoon aukon, josta se pääsee virtaamaan läpi laskien turbiinin hyötysuhdetta. Sähkön hinta on vuonna 2017 erittäin alhaalla [83], eikä hinnalle ole odotettavissa merkittävää nousua lähivuosina. Näin ollen, turbiinin hyötysuhteen laskua ei nähdä vakavana taloudellisena tappiona verrattaessa korjaustoimenpiteiden hintaa hyötysuhteen laskusta syntyvään tulon menetykseen [8]. Hyötysuhteen laskua suurempi ongelma olisi kulumisesta seuraavat vahingot, kuten palojen irtoaminen kiekkoista.

Jakotasoja on aiemmin korjattu hitsaamalla jakotasoihin Inconel 600 -korjaushitsit. Aiempina vuosina tehdyt korjaushitsaukset ovat kestäneet eroosiokorroosion hyvin, mutta hitsien vieressä oleva siipikeikkojen perusaine on kulunut paikoin erittäin voimakkaasti. Johtosiipikeikkojen jakotason kulumisen pysähtyy korjaushitsiin, mutta saattaa aiheuttaa voimakasta kulumista vastaavien paikkojen hiiliteräksessä muodostaen kohtia, joissa höyry pääsee pyörteilemään aiempaa voimakkaammin ja kuluttamaan hiiliterästä enemmän kuin ennen korjausta. Tästä johtuen tehtävien korjaushitsausten sijoittelulla on merkitystä. Hitsien tarkkaan suunnitellun sijoittelun lisäksi on kiinnitettävä huomiota, että jakotasojen lopullinen käsittely tuottaa jakotasolle tasaisen pinnan, eikä siihen jää epätiiviitä kohtia, joissa höyry voi alkaa pyörteilemään kuluttaen hiiliterästä.



Kuva 52. Johtosiipikeikon jakotason kulumisen höyryvuodon seurauksena.

Kuva 52 esittää mekanismin, jolla jakotasolle vuotanut höyry kuluttaa kiekon perusainetta siipien ja aiemmin tehtyjen korjaushitsien vierestä. Höyryn törmätessä hitsiin tai siiven kiinnitykseen se ei pääse etenemään yhtä vaivattomasti kuin perusaineen pinnalla, minkä seurauksena hitsin ja siiven kiinnityksen viereen muodostuu väkevöityneen höyryn aiheuttamia pyörteitä.

Kostean höyryn alueella korroosio saattaa kiihdyttää eroosiota paikoissa, joissa eri materiaalit ovat vierekkäin. Tällaisia galvaaniselle korroosiolle alttiita kohtia ovat paikat, joissa hiiliteräs ja korjaushitsi tai siiven kiinnitys. Galvaanisessa sarjassa aktiivitilassa oleva ruostumaton kromiteräs (siivet) ja hiiliteräs eivät poikkea merkittävästi toisistaan, mutta kromiteräksen passivoituminen kasvattaa eroa huomattavasti [12, s. 32]. Myös Inconel 600 passivoituessaan kasvattaa jalousastettaan kauemmas hiiliteräksestä [12, s.

32]. Näin ollen Inconel 600:n tai ruostumattoman teräksen passivoituminen voi kosteissa olosuhteissa muodostaa korroosiota aiheuttavan galvaanisen parin hiiliteräksen kanssa. Johtosiipikiekkojen jakotasot ovat riskialttiita erityisesti, jos jakotaso on syystä tai toisesta epätiivis.

Jakotason korjausten suunnittelua vaikeutti johtosiipien materiaali. Johtosiipikiekot ovat hiiliterästä, joten niiden koneistaminen ja hitsaaminen eivät vaadi erityisiä toimenpiteitä. Teräksen hitsattavuus heikkenee kromipitoisuuden kasvaessa [84], tästä johtuen hitsattavissa rakenteissa kromin määrä on tyypillisesti rajoitettu mahdollisimman pieneksi. Koska johtosiivet on valmistettu martensiittisestä ruostumattomasta teräksestä, niiden hitsauksessa ja koneistuksessa tulee olla tarkka lämpökäsittelyjen ja hitsausmenetelmää valitessa. Viimeiset johtosiivet on valmistettu vastaavasta X12Cr13-teräksestä muiden johtosiipien kanssa, mutta hitsattavuuden parantamiseksi niiden lämpökäsittelynä on ollut hehkutus; muut johtosiivet on lämpökäsitelty karkaisemalla ja päästämällä. Johtosiipikiekkojen reunat ja vaikeimmin kuluneet kohdat päätettiin hitsata Inconel 600-lisäaineella ja jakotasojen muut riskialttiit kohdat pinnoittaa vastaavalla pinnoitteella kuin turbiinin pesä pinnoitettiin, Telatekin TE-22 kaariruiskutettavalla pinnoitteella. Korjausten valmistelun yhteydessä jakotasojen kulumisen huomattiin olevan arvioitua runsaampaa ja siksi jakotasojen pahimmat ongelmakohdat päätettiin korjata hitsaamalla.



Kuva 53. *Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 2 jakotason korjaushitsauksia [85].*

Jakotasot päätettiin koneistaa alimittaiseksi ja hitsata Inconel 600-lisäaineella. Esimerkiksi johtosiipikiekkojen korjaushitseistä on esitetty Kuvassa 53. Ennen hitsaamista kiekkojen magnetiitti poistettiin lasikuulapuhaltamalla ja hitsattavat kohdat alikoneistettiin 1 mm syvyyteen. Hitsauksen jälkeen korjatut kohdat jysrittiin, kaavattiin ja hiottiin. [85]



Kuva 54. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekon 3a jakotason pinnoitus [85].

Korjaushitsausten lisäksi, kiekon 3a jakotaso pinnoitettiin paikoin ruiskutuspinnoitteella. Kuva 55 esittää pinnoitetun johtosiipikiekon jakotason. Ruiskutuspinnoite voitiin viedä myös johtosiiven materiaalin päälle. Samalla menetelmällä ja lisäaineella pinnoitettiin myös johtosiipikiekkojen kuluneet pystytiivistepinnat.



Kuva 55. Pinnoitettu Salmisaaren vp-turbiinin johtosiipikiekko: vasemmalla karusellisorviin asennettuna pinnoituksen jälkeen; oikealla koneistettu ja valmis pystytiivistepinta.

Pystytiivistepinnat koneistettiin alimittaisiksi, jonka jälkeen eniten kuluneet kohdat täytehitsattiin. Pinnat ruiskutettiin kauttaaltaan TE-22 pinnoitteella ja lopuksi koneistettiin karusellisorvin avulla oikean mittaiseksi. Kuvassa 55 vasemmalla johtosiipikiekko on asetettu karusellisorviin pinnoituksen jälkeen. Lopputuloksena pystytiivistepinnoista saatiin kovat ja tasaiset. Koneistettu pystytiivistepinta on Kuvassa 55 oikealla. Pinnoitettujen pystytiivistepintojen kovuus testattiin Equotip-kovuusmittarilla ja todettiin olevan noin 270 HV, mikä vastaa Telatekin antamaa tietoa pinnoitteen kovuudesta (260–300 HV [81]). Pystytiivistepintojen korjauksen yhteydessä korjattiin myös johtosiipikiekkojen pohjakiilojen paikat ja roottorin viereisten labyrinttiivisteiden segmenttien urat.

Johtosiipien siiven juuriin muodostuneet reiät korjattiin hitsaamalla. Pintaan avonaiset reiät porattiin ja hiottiin laajemmiksi. Käsittelyn yhteydessä reikien huomattiin laajenevan pinnan alla. Avatut reiät täytettiin hitsaamalla. Korjaushitsaus tehtiin johtosiiven ja johtosiipikiekon perusaineen rajapintaan. Siipien juurten viereiset reiät hitsattiin johtosiipikiekoissa 1, 1a, 2a, 3 ja 3a.

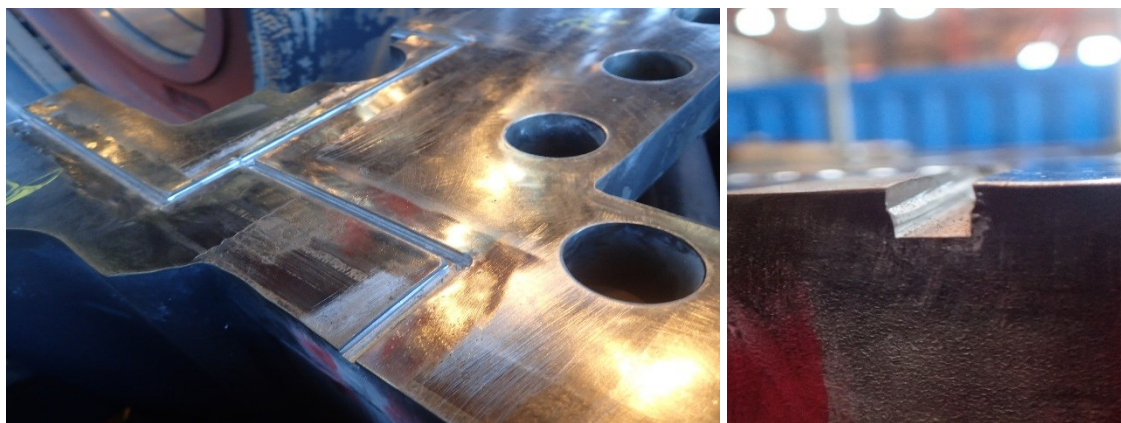
Kiekkojen 2 ja 2a hunajakennottiivisteiden viereiset reunat (Kuva 52:ssa siniset alueet) olivat kuluneet puoleen alkuperäisestä materiaalivahvuudesta. Jos kulumiseen ei olisi reagoitu, hunajakennottiivisteet olisivat todennäköisesti irronneet kiekkoista ajon aikana seuraavien vuosien aikana. Tilanne päätettiin korjata pinnoittamalla alueet plasmaruis-kutettavalla Telatekin TE-29 kromia, alumiinia ja molybdeenia sisältävällä teräspinnoitteella. Kyseisestä pinnoitetta on käytetty muualla hyvällä lopputuloksella vastaavien ongelmakohtien korjaamiseen [81]. Pinnoitteen mikrokovuus on 350 HV [81]. Koostumuksensa ja kovuutensa puolesta pinnoitteen pitäisi kestää jaksojen 2 ja 2a haastavat eroosiokorroosio-olosuhteet.

Johtosiipikiekolle 5a ei tehty tämän huollon yhteydessä mitään. Kiekon kulumisen oletetaan jatkuvan tasaisesti. Kiekosta ei oleteta irtoavan paloja, jotka voisivat vahingoittaa roottoria.

Pesän puoleisten pystytiivistepintojen läpipuhallusjäljet hitsattiin vähäseosteisella täytelangalla eniten kuluneen jakson 2 kohdalta pesän ylä- ja alapuolesta. Täytelangaksi valittiin vähäseosteinen teräslanka, jotta hitsi vastaisi mahdollisimman hyvin pesän materiaalia. Pystytiivistepinta koneistettiin alkuperäiseen mittaan aarporaamalla. Hitsattujen kohtien viereiset alueet saattavat toimia kohtina, joissa ilmenee tulevaisuudessa eroosiokorroosiota. Jos puhallusjäljet olisi hitsattu paremmin eroosiota kestäväällä hitsausli-säaineella, riski olisi kasvanut suuremmaksi. Jos kohdat olisi jätetty hitsaamatta, eroosiokorroosion määrä pesän puoleisissa pinnoissa olisi todennäköisesti kasvanut, koska vastaavan johtosiipikiekon pystytiivistepinta pinnoitettiin eroosiokorroosiota kestäväällä pinnoitteella.

4.3.3 Pesän jakotason tiiveyden varmistaminen

Pesän teräslaadut, S235JR ja S355J0, ovat seosaineiden osalta lähellä toisiaan. Merkittäv in ero seosaineissa on, että S355J0 sisältää piitä, mutta S235JR ei. Vaikka seosaineet eivät merkittävästi poikkea toisistaan terästen ominaisuuksissa on eroja. S355J0:n myötöraja on 120 MPa korkeampi kuin S235J0:n myötöraja. Myös S355J0:n murtolujuus ja kovuus ovat korkeampia kuin S235J0:lla. [50] Kumpikaan teräslaaduista ei sisällä kromia, minkä vuoksi molemmat laadut ovat alttiita eroosiokorroosiolle.



Kuva 56. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän jakotason eroosiestopparin koneistettu ura.

Pesän jakotason tiiveyden varmistamiseksi pesän ylä- ja alapuolen jakotasoihin valmistettiin eroosiestopparit Skodan valmisteleman korjaussuunnitelman mukaisesti hitsaamalla. Pesän ollessa kiinni eroosiestopparit ovat vastakkain. Jos jakotaso ei pysy tiiviinä ja höyry pääsee kuluttamaan jakotason perusainetta, eroosiestoppareiden tehtävänä on pysäyttää kulumisen hitsin rajapintaan. Stopparit sijoittuvat turbiinin jakotasoon johtosiipien kiinnityksen viereisten painepintojen läheisyyteen; kohtiin, joissa höyryllä on suurin riski päästä vuotamaan jakotasolle. Pesän jakotasoon koneistettiin urat ja urien reunat lyötiin ylös. Valmiit urat on esitetty Kuvassa 56. Reunojen lyömisen tarkoituksena oli estää reunahaavan syntyminen hitsin ja jakotason perusaineen väliin.



Kuva 57. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin eroosiestopparihitsit ennen koneistusta ja koneistuksen jälkeen.

Urat täytettiin TIG-hitsaamalla runsaskromisella nikkelpohjaisella lisäaineella EN ISO 18274: Ni 6082 (NiCr20Mn3Nb), Kuvan 57 tavoin. Hitsit koneistettiin ja skaavattiin pesän nollapinnan tasolle. Valmis korjaus on esitetty Kuvassa 57 oikealla. Korjaustekniikka on vastaava johtosiipikiekkojen jakotasojen vanhojen korjausten kanssa.

Tehtyjen eroosiestoppareiden kanssa ilmeni ongelmia, jotka saattavat vaikuttaa pesän jakotason kulumiseen tulevaisuudessa. Kun koneistuttujen urien reunat lyötiin ylös, hit-

sattiin ja koneistettiin, huomattiin, että hitsin vierestä pesän jakotason pinta oli painunut jakotason nollapinnan alapuolelle. Ongelman syytä analysoitiin ja todettiin, että ongelma johtui todennäköisesti lyönnin ja hitsin yhteisvaikutuksesta. Ongelmaa ei ilmennyt jokaisen stopparin kohdalla, vaan ainoastaan niissä, joissa hitsi oli lopetettu pidemmälle harjan yli. Viimeisten stopparien valmistuksessa urien reunat lyötiin korkeammalle, jotta hitsi saatiin lopetettua uran reunan harjalle. Nollatasoa alemmaksi jääneiden pintojen lisäksi, osassa hitseistä huomattiin reunahaavaa; eli hitsin ja perusaineen väliin oli jäänyt pieni rako. Reunahaavat päätettiin kuitenkin jättää korjaamatta, etteivät hitsauksen aiheuttamat lämpökäsittelyt rasittaisi pesän materiaaleja ja synnyttäisi suurempaa vahinkoa.

Johtosiipikiekoista voidaan todeta, että eroosiokorroosiota kestävät korjaushitsit pysyvät kulumattomina, mutta pesän jakotason perusaine voi kulua enemmän kuin se kuluisi ilman eroosiostoppareita. Jos kulumisen määrä ei merkittävästi lisäännä, eroosiostopparit pitävät jakotason kulumisen pesän sisäpuolella. Jos kuluminen on paikoin aiempaa voimakkaampaa, on riski, että höyry pääsee syömään jakotason perusainetta hitsin ali. Eroosiostoppareiden viereiset nollatason alapuolelle jääneet jakotason kohdat aiheuttavat jakotasoon väljemmän kohdan höyryn virtauksen puolelle juuri ennen eroosiostopparia. Jos höyry pääsee virtaamaan jakotasolta eroosiostopparille asti, sillä on enemmän tilaa pyörteillä ennen eroosiostopparia. Suurempi pyörteilyn määrä voi aiheuttaa teräksen kulumisen kiihtymisen pyörteilyn ja rakokorroosion seurauksena. Stopparin syvyys on 5 mm, joten höyryn paikallisen kulutuksen tulee olla erittäin voimakasta, jotta se pääsisi kuluttamaan pesän perusaineen pintaa niin paljon, että höyry pääsisi kulkemaan stopparin ali. Riskin ohivuotoon voida katsoa olevan pieni.

Tiiveyden lisäämiseksi jakotason kriittisten kohtien pultit vaihdettiin isompiin pesän liikkeiden minimoimiseksi. Lopulliseen tiivistykseen jakotasoon tehtiin uusia uria, jotka täytettiin turbiinin ylösajon aikana tiivistysmassalla. Vastaavaa massaa on käytetty ydinvoimalaitosten turbiinien tiivistykseen. Massaa voidaan lisätä ajon aikana, jos pesän tiiveys alkaa heikentyä.

4.4 Tulevaisuuden korjaustarve

Salmisaaren voimalaitokselle on suunniteltu seuraava turbiinihuolto vuodelle 2022. Turbiinihuollon ajankohta määräytyy korkeapainepesän käyttötuntien mukaan [8]. Turbiinin välipainepesä pyritään avaamaan samaan aikaan korkeapainepesän kanssa. Kesällä 2017 tehtyjen korjaustoimenpiteiden tavoitteena on pitää turbiini käyttökunnossa seuraavaan huoltoon asti ja optimoida seuraavassa huollossa tehtävien korjaustoimenpiteiden määrä ja laatu.

Kesällä 2017 korjaustoimenpiteiden suunnittelulle ja toteutukselle oli rajoitettu aikataulu. Turbiini on ollut käytössä vasta viisi vuotta, eikä vaurioiden todellista laajuutta osattu arvioida. Pinnoituksen avulla tulevaisuuden korjaustoimenpiteiden tarve pystytään

minimoimaan, mutta mikäli höyrynkosteus turbiinissa nousee, saattaa uusia ongelmia ilmetä. Tehtyjen korjaustoimenpiteiden voidaan katsoa minimoivan kulumisen, muttei täysin estävän sitä. Turbiiniin jäi useita korjausta vaativia kohtia.

Turbiinin tilaa tulee tarkkailla seuraavien vuosihuoltojen aikana. Seuraavan vuosihuollon aikana pystytään tarkastamaan, onko pesän pinnoitus pysynyt moitteettomana. Jos pinnoite lohkeilee pesän pinnoilta, pinnoitteen tartunta ja pohjakäsittelyt eivät ole olleet riittävät. Turbiinin kosteutta ja pinnoitteen kestoa voidaan parhaiten arvioida tarkastelemalla Vo0:n puoleista diffuusoria. Vesipisaraeroosion määrä saattaa nousta kyseisessä kohdassa niin voimakkaaksi, ettei pinnoite ole riittävä. Diffuusori voitaisiin tulevaisuudessa pinnoittaa esimerkiksi stelliittihitsauksella. Diffuusorin kulumisen ei aiheuta merkittävää haittaa Salmisaaren vp-turbiinille, joten jos nykyinen pinnoitus ei kestä, kulumisen estävä korjaus ei ole välttämätön. Pinnoituksen lisäksi turbiinin kuntoa tulee tarkkailla johtosiipikiikkojen ja juoksusiipien osalta. Turbiinin riskialteimpia kohtia, kuten jaksojen 3 ja 3a hunajakennojen reunoja, ei päästä tarkastamaan endoskooppiyhteiden kautta. Turbiinin todellisesta kunnan kehittymisestä ei saada tarkkaa kuvaa ennen seuraavaa huoltoa.

Johtosiipikiikkojen jakotasot ja pystytiivistepinnat saatiin korjattua niin, että niiden oletetaan kestävän hyvin turbiinin olosuhteita. Johtosiipien juurien hitsaamalla täytettyjen reikien etenemistä ei pystytä ennustamaan. Siipien kiinnityksen rakenne päästää höyryn virtaamaan siipien välistä. On mahdollista, että höyry pääsee virtaamaan täytehitsin ympäriltä irrottaen hitsin. Seuraavan huollon aikana reikien tilanne tulee tarkastaa huolellisesti. Reikien etenemistä voi yrittää arvioida endoskooppitarkastusten avulla. On kuitenkin todennäköistä, ettei endoskooppitarkastuksen avulla pysty arvioimaan tilannetta luotettavasti. Ongelman korjaamiseen ilman johtosiipien irrottamista kiekosta ei ole löydetty ratkaisua. Johtosiipien irrottaminen ja kiekkojen korjaaminen eivät myöskään ole mahdollisia toimenpiteitä, sillä johtosiivet joudutaan korvaamaan uusilla, jos ne irrotetaan kiekosta. Näin ollen johtosiipikiekot suositellaan korvattavaksi paremmin eroosiokorroosiota kestävästä materiaalista valmistetuista kiekkoista.

Viimeinen johtosiipikiikko suositellaan korvattavan paremmasta materiaalista valmistetulla kiekolla. Kiekko on kärsinyt eroosiokorroosiosta ja vesipisaraeroosiosta. Kiekon pinta on kulunut viiden vuoden aikana merkittävästi. Kuluneiden pintojen korjaaminen on erittäin haastavaa. Pinnat voitaisiin periaatteessa suojata pinnoittamalla, mutta johtosiipien ahtaat välit rajoittavat mahdollisia menetelmiä. Pintojen koneistaminen on käytännössä mahdotonta, joten pinnoitus saattaisi muuttaa kiekon dimensioita. Kiekon korjaamista ei nähdä kannattavana ratkaisuna.

Pesän pystytiivistepinnoissa havaittiin puhallusjälkiä kesällä 2017. Jakson 2 pesän puoleinen pinta korjattiin täytehitsaamalla pahimmat puhallusjäljet. Tehty toimenpide oli ensiapu, eikä sen odoteta kestävän turbiinin olosuhteita pitkiä aikoja. Pesän pystytiivistepinnat, joihin kesän 2017 huollon yhteydessä jäi höyryn puhalluksen aiheuttamaa epä-

tasaisuutta ja joiden vastaavan kiekon pystytiivistepinta pinnoitettiin kestäväksi, odotetaan kuluvaan tulevien ajokausien aikana. Pintoja ei pääse tarkastelemaan ennen kuin johtosiipikiekot nostetaan pois pesästä. Kaikki pystytiivistepinnat suositellaan koneistettavaksi alimittaiseksi, pinnoitettavaksi kromipitoisella, eroosiokorroosiota kestäväällä pinnoitteella ja koneistettavaksi alkuperäiseen mittaansa seuraavan huollon yhteydessä. Korjaustoimenpiteen suunnittelussa tulee huomioida johtosiipikiekkojen pystytiivistepintojen materiaali.

Turbiinin siivet on tehty teräksestä, jonka pitäisi kestää hyvin turbiinin suunnitellut olosuhteet, mutta kosteuden kasvaessa ja paineen pienentyessä turbiinin viimeisten jaksosten siivet ovat alttiita vesipisaraeroosiolle. Siipien vahvistetuissa kärjissä on merkkejä vesipisaroiden iskeytymisestä. Juoksusiipiä on mahdollista pinnoittaa ja suojata kestävämpään paremmin vesipisaroiden iskeytyminen. Juoksusiipien profiili ei kuitenkaan saa muuttua alkuperäisestä, eikä juoksusiipien pinnoittamista nähdä kustannustehokkaana ratkaisuna. Nykytilassa viimeisten juoksusiipien kulumisen on vähäistä, eikä vaikuta merkittävästi turbiinin sähkötehoon. Juoksusiipien kulumista pystytään seuraamaan seisokkien aikaisten endoskooppitarkastusten avulla. Jos kulumisessa näkyy selkeää lisääntymistä, turbiinin kosteutta ja turbiinin vastapainetta tulee tarkastella kriittisesti. Vaikka vaikutus juoksusiipiin on vähäinen, kosteuden nousu vaikuttaa muihin turbiinin komponentteihin. Jos juoksusiivissä havaitaan kulumisen lisääntymistä, muiden turbiinin peräpään komponenttien kulumisen oletetaan myös lisääntyneen.

Seuraavan huollon yhteydessä faasimuutosalueen juoksusiipien kiinnitykselle suositellaan automatisoitua vaiheistettua ultraäänitarkastusta. Tarkastuksen tarve kasvaa, jos prosessi joudutaan ajamaan ylös/alas poikkeuksellisen monta kertaa. Äkilliset alasajot lisäävät tarkastuksen tarvetta. Lisäksi turbiinin kuivatuskäytäntöjä voisi analysoida kriittisesti. Alasajossa turbiini pyörii vielä kosteana ja turbiiniin saattaa päästä virtaamaan happea. Paaksilla ollessaan turbiini pyörii rauhallisesti ja hallitusti, joten siihen kohdistuvat jännitykset ovat vähäisiä. Kuitenkin pienetkin jännitykset voivat yhdessä hapen ja kosteuden kanssa ydintää jännityskeskittymistä aiheutuneita säröjä.

4.5 Muut tutkimukset

Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin lisäksi Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten, Vuosaaren B- ja Hanasaaren (T3) voimalaitosten välipaineturbiinien materiaalien tilannetta päästiin tutkimaan. Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihtimet ovat suoraan yhteydessä välipaineturbiiniin, joten turbiinilla tapahtuvat muutokset vaikuttavat myös kaukolämmönvaihdinten materiaaleihin. Vuosaaren b-voimalaitoksen välipaineturbiini on Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin tavoin kahteen suuntaan paisuva vastapaineturbiini, jolle höyry tulee turbiinin korkeapainepesästä välitulistamattomana; näin Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin materiaalien tilaa ja höyryn paisuntaa voidaan verrata keskenään. Koska Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiiniin höyry tulee välitulistettuna, ei sen tilaa voida verrata täysin Salmisaaren

voimalaitoksen vp-turbiinin tilaan. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin paisuntaa ja turbiinin materiaalien kuntoa voidaan käyttää määritettyjen eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion alueiden todentamiseen.

4.5.1 Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihtimet

Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisuntaan liittyvät ongelmat olivat havaittavissa myös kaukolämmönvaihtimilla. KLV1 ja KLV2 ovat keskenään identtiset. Yksi vaihdin koostuu putkipaketista ja sitä ympäröivästä vaipasta. Vaihdinten putkipaketit on uusittu vuonna 2010. Putkipaketin päällä on umpinaisia pyörötankoja, jotka on valmistettu vastaavasta teräksestä Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin jakotason kanssa, eli S235JR-hiiliteräslaadusta. Umpitangot sijaitsevat kaukolämmönvaihtimelle johtavan kanavan suulla ja niiden on suunniteltu suojaavan putkia pisaraeroosiolta. Neljä ulointa kehää varsinaisista putkista on valmistettu X2CrNiMoN22-5-3 duplex-teräksestä ja loput P235GH-hiiliteräksestä.

Kaukolämmönvaihdinten 1 ja 2 vaippojen on havaittu kuluneen niin, että lähivuosina ne tulevat vaatimaan korjaustoimenpiteitä. Vuosihuollon 2016 aikana kaukolämmönvaihdinten vaipasta otettiin laajat paksuusmittaukset. Mittaukset osoittivat, että molempien vaihdinten vaipat olivat kuluneet höyryn tulokanavan kohdalta.

Kesällä 2017 kaukolämmönvaihdinten tilanne tutkittiin vaihdinten sisältä. KLV1:lle tuleva höyry on huomattavasti KLV2 kosteampaa. Vaihdinten kulumisessa ei havaittu merkittäviä eroja toisiinsa verrattuna. Tutkimuksissa havaittiin vaihdinten vaippojen kuluneen laajalti vaihtimille tulevien kanavien kohdilta. Vaihtimessa 2 umpitangot vaikuttivat kuluneen tasaisesti kanavan leveydeltä, mutta vaihtimessa 1 kulumisen keskittyi erityisesti kanavan toiseen reunaan. Putkipakettien sivuilla, duplex-putkien vierellä olevat S235JRG2-teräksestä valmistetuissa tukiputkissa oli havaittavissa kulumista. Duplex-putket olivat visuaalisen tarkastelun perusteella moitteettomassa kunnossa. Kuvia vaihtimista on esitetty Liitteessä 5.

Vaihdinten putkipakettien päällä olevat umpitangot olivat kuluneet pisaraeroosion seurauksena. Tangoista otettiin satunnaisia paksuusmittauksia. Paksuusmittausten tulokset on esitetty Taulukossa 13. Tankojen suunnittelupaksuus on 16 mm.

Taulukko 13. *Kaukolämmönvaihdinten umpitankojen paksuusmittausten tulokset.*

	Hiottu	Hiomaton	Kerrostuman päältä
KLV1	15,26–15,75 mm	16,10 mm	15,72 mm
KLV2	15,41–15,81 mm	15,17 mm	16,22 mm

Tangoista otettuja paksuusmittauksia ei voida pitää luotettavina, sillä mittaukset otettiin tangoista, joiden pinta oli kulunut pisaroiden iskuista paikoin huokoisiksi. Huokoisuus-

den vuoksi ei voida sanoa kuvaavatko mitatut paksuudet tankojen ohentuman todellisia arvoja. Tuloksien perusteella KLV1:n umpitankojen voidaan katsoa kuluneen hieman KLV2:n tankoja enemmän.

Myös KLV2:n kanavan tukitankojen ohentumaa mitattiin. Tankojen yläpuolelta paksuudeksi saatiin 7,8–8,8 mm ja tankojen alta 8,8–9,0 mm. Tästä voidaan arvioida, että tukitangot ovat kuluneet paikoin noin 1 mm. Tangot on valmistettu S235JR-teräksestä.

Paksuusmittausten tulosten tulkintaa varten tarvittaisiin alkuperäinen kulumaton umpitanko, jota voitaisiin käyttää referenssinä mittauksille. Referenssitankoa ei kuitenkaan ollut saatavilla, joten tulosten tulkinta tulee suorittaa vertailemalla umpitankojen kulumista eri kohdissa. Lisähaasteen tankojen kulumisen tulkintaan tuo niiden kapea muoto ja kulumisen aiheuttama pinnan huokoisuus. Absoluuttisen kulumisen määrittämiseksi tankojen pintaa tulisi hioa niin, että se olisi tasainen ja verrattavissa kapeimpaan tilaan. Nyt saadut tulokset eivät kuvaa eniten kuluneita huokosia, vaan enemmän tankojen kokonaispaksuuden ohenemaa. Saatujen tuloksien avulla pystytään kuitenkin arvioimaan kulumisen nopeutta. Paksuusmittausten tukena voidaan käyttää tangoista otettuja valokuvia.

Tankojen silmämääräinen tutkiminen osoitti, että tulevan höyryn tila ei ole pysynyt samana vuosina 2010–2017. Osa tangoista on ollut altistuneena vesipisaraeroosiolle ja eroosiokorroosiolle viimeisen ajokauden aikana, eikä kyseisten tankojen päällä ole havaittavissa magnetiittia höyryn tulosuuntaan nähden; osa tangoista on selkeästi kulunut aiemmin, mutta kuluneiden kohtien päälle on päässyt muodostumaan ehyt magnetiittikerros. Magnetiitin ja eroosiolle altistuneiden kohtien rajapinnat ovat kuluneet eroosiokorroosion seurauksena.



Kuva 58. Salmisaaren voimalaitoksen KLV1:n päällimmäisten umpitankojen kulunut pinta.

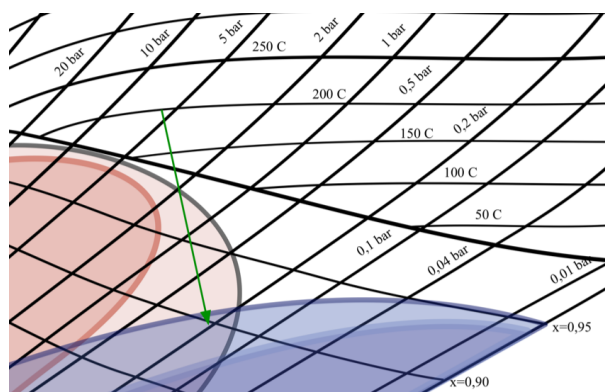
Umpitankojen kulunut pinta on esitetty Kuvassa 58. Turbiinilta tuleva kostea vesihöyry iskeytyy vaihdinten päällimmäisiin putkiin ja vaippaan suurella nopeudella. Turbiinilta tulevat vesipisarot pääsevät kulkemaan kanavassa lähes vapaasti kaukolämmönvaihtimille. Pisarot pääsevät kiihtymään matkalla kaukolämmönvaihtimelle lähelle höyrynno-

peutta. KLV1:een höyry tulee noin 212 m/s nopeudella ja höyryn sisältämien pisaroiden oletetaan kiihtyvän vähintään puoleen höyrynopeudesta. KLV2:lle tuleva höyry ei ole paisunut yhtä suureen nopeuteen kuin KLV1:lle tuleva höyry. KLV2:lle tuleva höyry on paisunut Mollier-diagrammin eroosikorroosioalueelle. KLV1:lle tuleva höyry on ohittanut pahimman eroosikorroosioalueen, mutta paisunut vesipisaraeroosion alueelle. Molemmille vaihtimille saapuessaan höyryyn on kertynyt suuria pisaroita turbiinin siipien ja väliottojen pinnoille kertyneistä vesikalvoista. Vaihdinten vaurioiden tarkastelusta voidaan päätellä vaurioiden merkittävimmän syyn johtuvan kaksifaasisen virtauksen FAC:sta ja vesipisaraeroosiosta.

4.5.2 Vuosaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiini

Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin tilanteelle referenssinä tarjoutui tilaisuus päästä tutkimaan Vuosaaren b-voimalaitoksen höyryturbiinin välipainetilaan. Välipainetilassa on turbiinin väliotot kaukolämmönvaihtimille ja sieltä on mahdollista tarkastella välipaineturbiinin viimeisiä juoksusiipiä. Turbiinin pesä on valmistettu P265GH (1.0425) -teräksestä. Siipien materiaali on X22CrMoV12-1 (1.4923), eli vastaava teräs kuin Salmisaaren viimeiset juoksusiivet.

P265GH myötöraja 20 °C:ssa on 265 MPa, $\sigma_{0,2}$ 100 °C:ssa on noin 200 MPa ja murtolujuus 20 °C:ssa 410–530 MPa. P265GH:n murtolujuus on vastaava kuin Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän S355J0:n murtolujuus. P265GH:n myötölujuus on samassa kokoluokassa Salmisaaren voimalaitoksen vp-pesän toisen teräslaadun S235JR:n kanssa. Koska lujuusominaisuudet vastaavat Salmisaaren voimalaitoksen pesän materiaalien ominaisuuksia, Vuosaaren voimalaitoksen turbiinin pesän materiaalin voidaan olettaa olevan yhtä lailla alttiina vesipisaraeroosiolle. Kuvassa 59 on esitetty Vuosaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunta, kun tulohöyryn lämpötila on 190 °C ja paine 6 bar. Turbiinin loppupää on alttiina vesipisaraeroosiolle kuvan osoittamalla paisunnalla.



Kuva 59. Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisunta, kun tulohöyryn lämpötila on 190 °C ja paine 6 bar.

Tutkimuksia varten molemmille kaukolämmönvaihtimille johtaviin väliottoihin ja kanaviin rakennettiin telineet, jotta turbiinin loppupäiden kunto pystyttäisiin mahdollisimman hyvin tarkastamaan. Molemmissa väliotoissa havaittiin eroosiokorroosiota.



Kuva 60. *VuB vp-turbiinin Vo1:n eroosiokorroosio.*

Turbiinin Vo1:n puoleisessa päässä havaittiin turbiinin pesän kohtia, joista pinnan magnetiitti oli liuennut ja pesän perusaine oli altistunut eroosiokorroosion aiheuttamalle kulumiselle. Kuvassa 60 esitetty pesän pinta, jossa magnetiittia on liuennut pois ja perusaine altistunut. Vastaavia alueita havaittiin laajoilla alueilla pesän seinissä. Kuluminen näissä kohdissa on ollut erittäin maltillista, eikä materiaalipaksuuden katsota erityisesti ohentuneen. Paikallisesti turbiinin Vo1:n puoleiset pinnat olivat kuluneet Kuvan 60 vasemman puoleisen kuvan tavoin kuopille. Kuvan kaltaiset jäljet olivat halkaisijaltaan noin 10 cm. Pesän perusaine oli kulunut jälkien kohdilta epätasaiseksi ja uurteiseksi. Jäljistä voidaan päätellä, että kulumisen on magnetiitin liukenemisen aiheuttaman korroosioreaktion lisäksi johtunut kaksifaasisen virtauksen pyörteilystä aiheutuneesta FAC:sta.



Kuva 61. *VuB vp-turbiinin Vo0:n eroosiokorroosio.*

Vo1:n tavoin Vo0:n seinien magnetiittikalvo oli kulunut laajoilta alueilta, kuten esitetty Kuvassa 61 vasemmalla. Vo0:ssa pintojen kulumisen oli laaja-alaisempaa ja kohdat, joissa perusaine oli paljastunut magnetiitin alta, olivat kuluneet enemmän kuin Vo1:ssä. Kuluminen voidaan näissä kohdissa katsoa kuitenkin olevan erittäin maltillista. Kuluminen näytti kasvavan suhteelliselta pinta-alaltaan kaukolämmönvaihtimelle vievässä kanavassa. Laajojen alueiden kulumisen lisäksi Vo0:n muilla pinnoilla havaittiin

magnetiitin kulumista laikukkaasti. Ilmiö on esitetty Kuvassa 61 oikealla. Kuluminen muistutti Vo1:n kulumista, mutta jäljet olivat halkaisijaltaan pääosin Vo1:ä pienempiä ja niitä oli määrällisesti Vo0:a enemmän ja laajemmilla alueilla. Jälkien kohdalla materiaalivahvuus ei ollut kulunut Vo1:n jälkiä enempää.



Kuva 62. VuB vp-turbiinin Vo0:n puoleisisten viimeisten juoksusiipien tuloreunassa oli havaittavissa pieniä merkkejä pisaraeroosiosta.

Vuosaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin viimeisten juoksusiipien tuloreunassa oli havaittavissa vesipisaraeroosion merkkejä. Vuosaaren voimalaitoksen turbiini toimii reaktioperiaatteella, mikä tarkoittaa, että höyry paisuu vielä viimeisissä juoksusiivissä ja kosteus Vo0:ssa on suurempi kuin kosteus ennen viimeisiä juoksusiipiä. Vastaavia pisaroiden aiheuttamia eroosiojälkiä ei havaittu Vo1:n puoleisissa viimeisissä juoksusiivissä.



Kuva 63. VuB vp-turbiinin Vo0:n tukitanko diffusorin vierestä.

Kuluneimmat pinnat sijaitsivat turbiinin pesän tukitangoissa, jotka sijaitsivat viimeisten juoksusiipien jälkeisen diffusorin läheisyydessä. Kuvassa 63 on esitetty pinta, jossa tukitangon kuluminen on tapahtunut vaihteittain. Paikoin tukitankojen kulumisen voidaan katsoa olleen erittäin voimakasta. Höyry virtaa diffusorilta tukitankojen ohi alas kaukolämmönvaihtimille. Kulumisen perusteella voidaan arvioida höyrynvirtauksen olevan tässä kohtaa erittäin voimakasta. Pinnanmuodossa voidaan huomata yhtäläisyyttä sen kanssa, että Vuosaaren B-voimalaitosta on ajatettu viimeisinä ajokausina usein pienemmällä kuormalla kuin aikaisempina vuosina. Pinnan magnetiitti on päässyt uusiutumaan altistuneen alueen reunoilta. Kuluminen on ollut seurausta vesipisaroiden iskuista ja eroosikorroosiosta.

4.5.3 Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiini

Hanasaaren voimalaitoksen T3:n välipainepesän Vo0:n ja viimeisten juoksusiipien tila päästiin tutkimaan kesällä 2017. Hanasaaren voimalaitoksen turbiini toimii aktioperiaatella. Turbiinin juoksu- ja johtosiivet on uusittu modernisoinnin yhteydessä. Turbiinin pesän loppupää on alkuperäinen ja se on valmistettu GP240GH (1.0619) -teräksestä. Johtosiivet ja juoksusiivet on valmistettu vastaavista teräslaaduista kuin Salmisaaren välipaineturbiinin siivet. Jaksot 1–4 ja 9–11 on valmistettu X22CrMoV12-1 (1.4923) -teräksestä, ja jaksot 5–8 sekä 12–13 X12Cr13 (1.4006) -teräksestä.

Taulukko 14. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän peräpään materiaali [50].

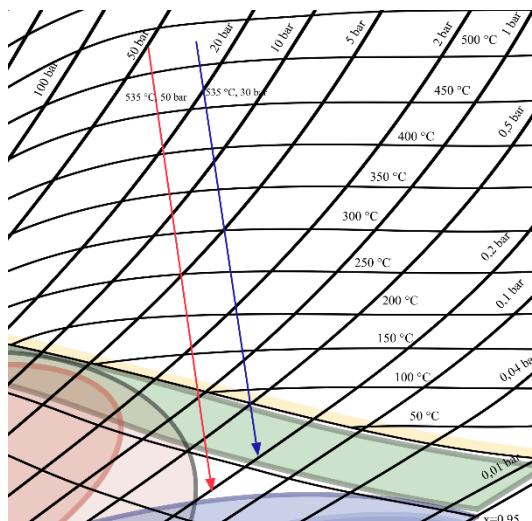
Teräslaatu	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Si	Ni	V	Cu
GP240GH, 1.0619	0,18– 0,23	0,50– 1,20	<0,030	<0,020	<0,30	<0,12	<0,60	<0,40	<0,03	<0,30

Taulukossa 14 on esitetty Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin pesän peräpään materiaalin koostumus. Pesä on valmistettu valuna. Kyseisen teräksen murtolujuus, R_m , on 420–600 MPa ja $\sigma_{0,2}$ 100 °C:ssa on 240 MPa [50]. Pesän lujuudet ovat vastaavassa kokoluokassa Salmisaaren ja Vuosaari B-voimalaitosten vp-pesien materiaalien kanssa. Uusien viimeisten jaksojen johtosiipikiekkojen materiaalitietoja ei ole saatavilla. Välipainepesän ensimmäiset johtosiipikiekkot on valmistettu 13CrMo4-5 (1.7335) -teräksestä ja vanhat ensimmäisten jaksojen johtosiipikiekkot oli valmistettu tšekkiläisestä laadusta 422744. Vanhat turbiinin viimeiset johtosiipikiekkot oli valmistettu laadusta 422713 (CZ). Kyseisten terästen standardin mukaiset koostumukset on esitetty Taulukossa 15.

Taulukko 15. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin uusien (ensimmäiset jaksot) ja vanhojen johtosiipikiekkojen materiaalit [50].

Teräslaatu	C	Mn	P	S	Cr	Mo	Si	Ni	N	V	Cu
13CrMo4-5, 1.7335	0,10– 0,17	0,40– 0,70	<0,025	<0,020	0,70– 1,15	0,40– 0,60	<0,35	<0,30	<0,012	-	<0,30
422744 (CZ)	0,11– 0,19	0,40– 0,70	<0,035	<0,035	0,50– 0,70	0,40– 0,60	0,20– 0,50	<0,40	-	0,20– 0,35	<0,30
422713 (CZ)	0,10– 0,18	0,90– 1,40	<0,040	<0,040	<0,30	-	0,20– 0,50	<0,40	-	-	<0,30

Vertaamalla teräslaatujen 13CrMo4-5 ja 422744 (CZ) koostumuksia, niiden voidaan todeta olevan lähellä toisiaan. Laadun 13CrMo4-5 kromipitoisuus on laadun 422744 (CZ) kromipitoisuutta suurempi, mutta pitoisuudet ovat samaa kokoluokkaa. Vanhojen viimeisten jaksojen kromipitoisuus on pienempi kuin ensimmäisissä jaksoissa. Uusien johtosiipikiekkojen voidaan olettaa olevan valmistettu hiiliteräksestä, johon on seostettu hieman kromia.



Kuva 64. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnat tulohöyryn lämpötilalla 535 °C ja paineilla 50 bar ja 30 bar.

Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin paisunta ei osu Mollier-diagrammin eroosiokorroosioalueelle. Turbiinin pesässä on merkkejä eroosiokorroosiosta. Turbiinin pesä on alkuperäinen ja kuvissa näkyvä kuluminen on tapahtunut pitkällä aikavälillä. Materiaalin kuluminen ei ole ollut yhtä voimakasta kuin Salmisaaren voimalaitoksen välipainepesän kuluminen.



Kuva 65. Hanasaaren voimalaitoksen T3:n välipainepesän viimeiset juoksusiivet ja Vo0.

Juoksusiipien tuloreunan tunnustelu tai endoskooppitarkastus ei antanut viitteitä vesipisaraeroosiosta. Viimeisissä juoksusiivissä havaittiin kerrostumaa. Kerrostumaa oli havaittavissa kauttaaltaan juoksusiipijaksossa Kuvan 65 esittämällä tavalla. Visuaalisen tarkastelun perusteella kerrostumasta voitiin havaita todennäköistä rautahydroksidia, eli pintaruostetta, sekä valkoisena ilmenevää silikaattia. Siipien pintojen havaittiin olevan epätasainen ja siinä näkyi höyryn virtauksen aiheuttamia uria. Kerrostumilla voi olla korrosoiva vaikutus teräkseen. Aikaisempien vuosihuoltojen yhteydessä otettujen kuvien perusteella voitiin todeta, että siivissä on ollut vastaavaa kerrostumaa myös edellisien tarkastusten aikana. Tämän suppean ja pintapuolisen tutkimuksen perusteella siiven perusaineen ei todettu kuluneen. Merkittävin haitta kerrostumasta on turbiinin hyötysuhteen aleneminen. Juoksusiipien pinnoille kerääntynyt ylimääräinen aines vaikeuttaa

höyryn virtaamista. Kerrostumasta otettiin näyte hiekkapaperilla mahdollisia jatkotutkimuksia varten. Kerrostuman analysoinnilla voidaan tutkia laitoksen vesikemian tilaa. Tutkimus antaisi lisätietoa säännöllisesti tehtävien mittausten lisäksi. Näytteen analysointia ei kuitenkaan nähdä välttämättömänä toimenpiteenä.



Kuva 66. Hanasaaren voimalaitoksen T3-vp:n takaseinä Vo0.

Turbiinin pesän pintojen magnetiittiin voitiin havaita kuluneen juoksusiivistä virranneen höyryn vaikutuksesta Kuvan 65 ja Kuvan 66 esittämällä tavalla. Vaikka pintojen magnetiitti oli kulunut, perusaineen ei havaittu ohentuneen merkittävästi juoksusiipien läheisyydestä. Pesän tukitankojen havaittiin silmämääräisesti menettäneen paikoin materiaalivahvuutta. Tukitangot olivat kuluneet Kuvan 66 osoittamista kohdista höyryn tulo-suunnasta juoksusiipien puolelta sekä pesän takaseinän puolelta sivuseinän vierestä. Turbiinin takaseinän perusaineen pintojen magnetiitti oli kulunut laajoilta alueilta.



Kuva 67. Hanasaaren voimalaitoksen T3:n Vo0:n seinät.

Pesän seinien magnetiitti oli paikoin kulunut Kuvassa 67 esitetysti. Paikoin seinien pinnoilla oli havaittavissa paksu magnetiittikerros, jonka vierestä pesän perusaine oli kulunut. Magnetiitin ja perusaineen välille on oletettavasti syntynyt korroosiopari, joka on aiheuttanut perusaineen kulumisen. Kulumista vahvistaa voimakas höyryvirtaus. Turbiinin paisuntakäyrä ei sijoitu eroosikorroosiolle alttiille alueelle, eikä pintojen magnetiitin oleteta olevan erityisen liukoista turbiinin paisunnan olosuhteissa. Pesän pintojen kulumisen voidaan katsoa johtuvan kaksifaasisen virtauksen FAC:sta ja vesipisaraeroosiosta. Vesipisaraeroosion osuus on vähäinen verrattuna Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiineihin. Vesipisaroiden iskeytymisen vaikutus on kuitenkin havaittavissa turbiinin tukitangoissa. Pesän elementtien kulumisen ei ole nopeaa, eivät

raportoidut pintavauriot aiheuta toimenpiteitä. Turbiinin pesä on alkuperäinen ja se on ollut käytössä yli 40 vuotta ja käyttötunteja sille on kertynyt noin 240 000 h [8]; pintojen kuluminen on käyttöikään nähden maltillista.

5. TURBIININ PAISUNNAN JA MATERIAALIONGELMIEN VÄLINEN YHTEYS

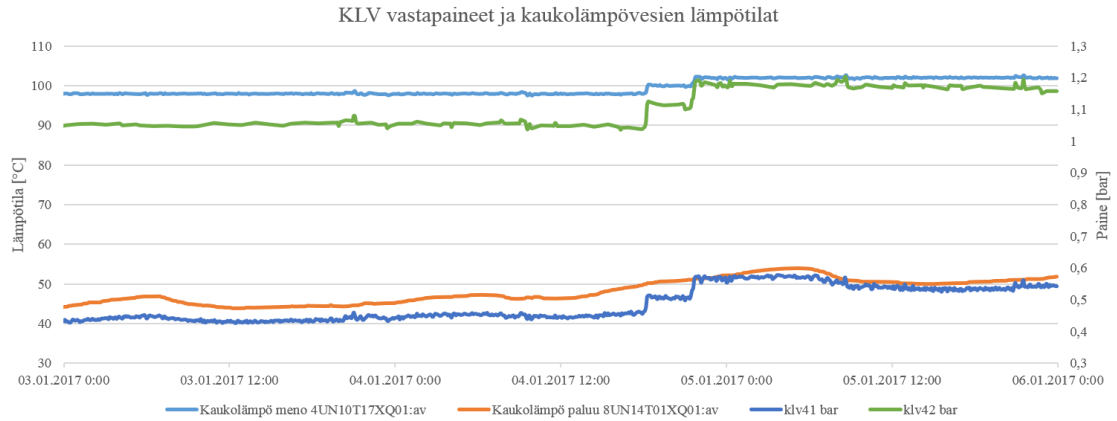
Kuten todettu, eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion esiintymiseen höyryturbiinissa vaikuttaa turbiinin paisuntakäyrän sijoittuminen Mollier-diagrammissa. Eroosiokorroosion riskiin vaikuttavat tulohöyryn lämpötila ja paine. Tulohöyryn parametrit vaikuttavat myös höyrynkosteuteen ja vesipisaraeroosion esiintymiseen. Vesipisaraeroosion esiintymiseen vaikuttaa paisuntakäyrän sijainnin lisäksi myös turbiinin vastapaine. Turbiinin vastapaine määräytyy kaukolämpövesien lämpötilojen mukaan. Tässä kappaleessa on tutkittu kaukolämpövesien lämpötilojen ja turbiinin tulohöyryn parametrien merkitystä turbiinien paisunnan osumiseen materiaaleille haastaville alueille.

5.1 Turbiinin vastapaineiden riippuvuus kaukolämpövesien lämpötiloista

Kaukolämpövesien lämpötilojen ja kaukolämmönvaihdinten vastapaineiden välistä yhteyttä päätettiin tutkia Hanasaaren voimalaitoksen prosessidatan perusteella. 2016–2017 ajokaudella kerätyn datan lisäksi Hanasaaren voimalaitokselle pystytettiin järjestämään kokeilu, jossa kaukolämmön menoveden lämpötilaa alennettiin mahdollisimman alas.

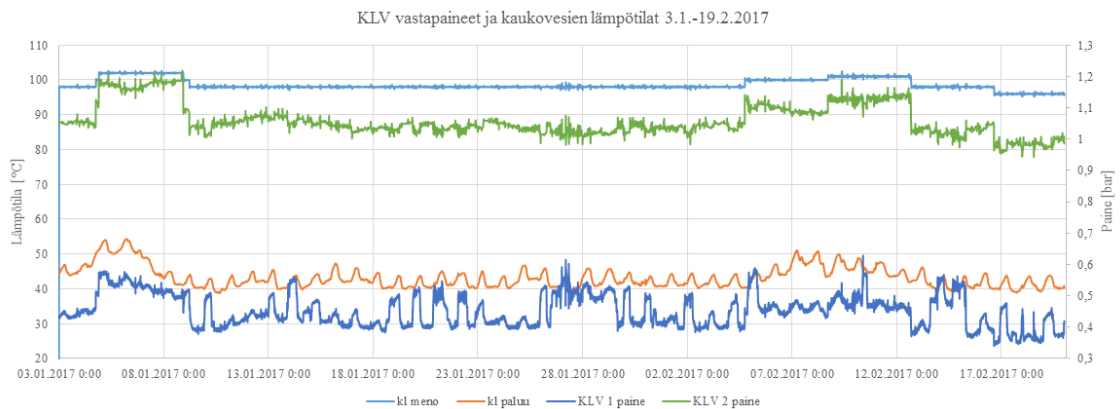
5.1.1 Hanasaaren voimalaitoksen prosessidata

Tutkimalla Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämmön meno- ja paluuvesien lämpötiloja pystytään analysoimaan turbiinin vastapaineiden yhteyttä kaukolämpövesien lämpötiloihin. Kaukolämmön paluueden lämpötilan ei oleteta riippuvan merkittävästi menoveden lämpötilan muutoksista. Paluueden lämpötilan oletetaan riippuvan pääsääntöisesti kaukolämpöverkolla tapahtuvista muutoksista. Päivittäisten kulutushuippujen aikaan kaukolämpövesi palaa viileämpänä voimalaitokselle. Kulutushuippujen aikaan voimalaitosta ajetaan suuremmilla tehoilla.



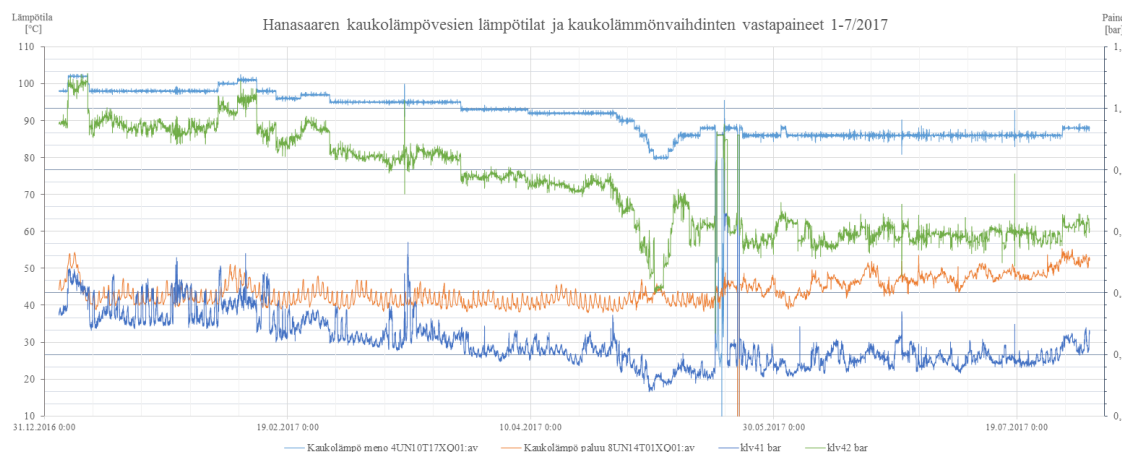
Kuva 68. Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet, 3.-5.1.2017.

Lyhyen aikavälin tarkastelu on esitetty Kuvassa 68. Lyhyen aikavälin tarkasteltusta havaittiin, että ensimmäisen kaukolämmönvaihtimen vastapaineen tummansininen käyrä myötäilee kaukolämmön paluuveden lämpötilan oranssia käyrää sekä kaukolämmön menoveden vaaleansinistä käyrää. Toisen kaukolämmönvaihtimen vastapaineen vihreä käyrä mukailee kaukolämmön menoveden lämpötilan käyrää.



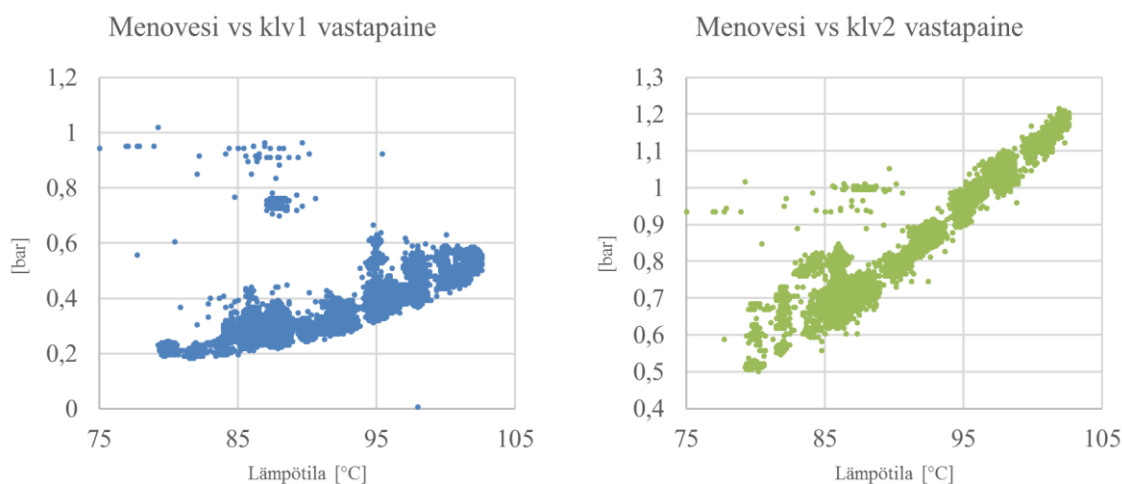
Kuva 69. Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet, 3.1.-19.2.2017.

Kun tarkasteluväli laajennetaan 1,5 kuukauteen, kuten Kuvassa 69. Tarkastelemalla pidempää aikataulua, pystytään havaitsemaan paremmin kaukolämmön paluuveden muutosten päiväsykli. Paluuveden lämpötilat ovat alhaisia aamuisin ja iltaisin.



Kuva 70. Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpöveden lämpötilat ja KLV vastapaineet 1.1.–31.7.2017.

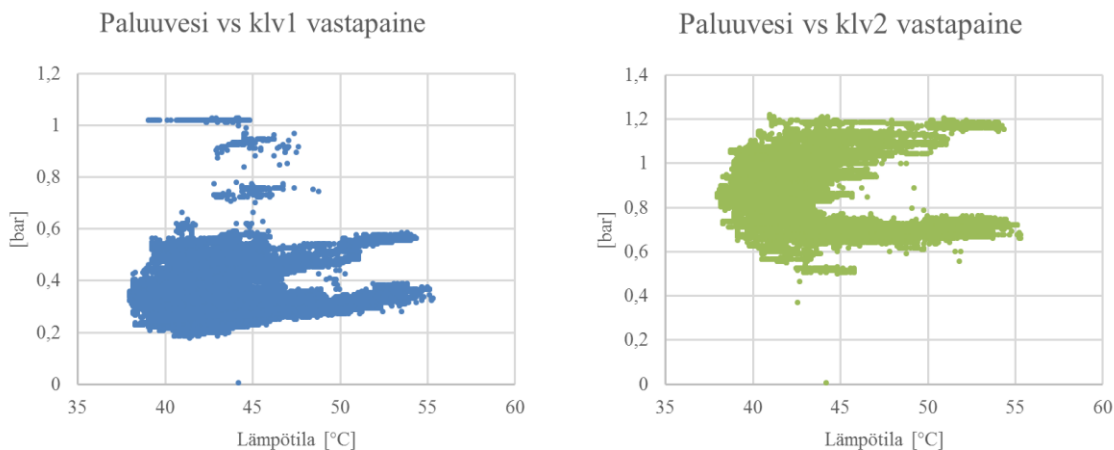
Kuva 70 esittää Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpövesien lämpötilat ja vastapaineet kevään ja alkukesän 2017 aikana. Vastapaineiden ja kaukolämpöveden lämpötilojen riippuvuuden tarkastelu yli puolen vuoden aikavälillä, osoittaa, että KLV1:n vastapaineen käyrässä on yhtäläisyyksiä kaukolämmön menoveden lämpötilakäyrän kanssa. Kesällä ajattaessa korkeammilla menoveden lämpötiloilla kuin lämmönkulutus vaatisi, kaukolämmön paluuv veden lämpötilan trendi on nouseva. Vastaavaa yhtä voimakasta nousua ei ole havaittavissa KLV1:n vastapaineessa. Talvella kaukolämmön menoveden lämpötilan ollessa noin 100 °C, KLV1:n vastapaine vaihteli 0,4 bar ja 0,6 bar välillä. Kesällä kaukolämmön menoveden lämpötilan ollessa alle 90 °C, KLV1:n vastapaine vaihteli 0,18 barin ja 0,4:n barin välillä. Alimmillaan KLV1:n vastapaine oli toukokuussa toteutetun kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamiskokeilun aikaan.



Kuva 71. Hanasaaren voimalaitoksen vastapaineiden ja kaukolämmön menoveden lämpötilan välinen yhteys aikavälillä 1.1.–31.7.2017.

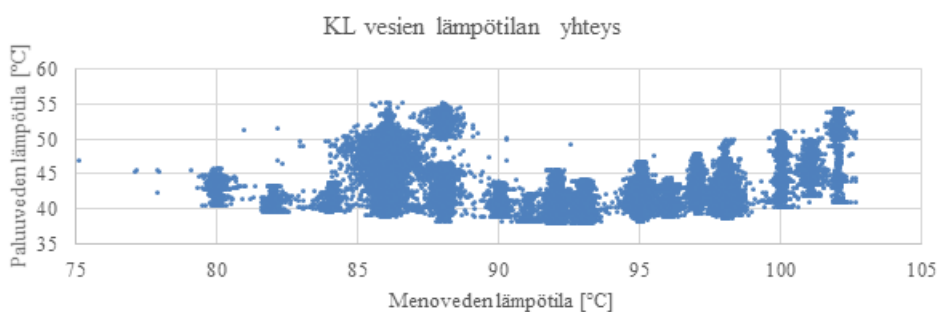
Tarkastelemalla kaukolämmön menoveden lämpötilan ja kaukolämmönvaihdinten vastapaineiden välisiä relaatioita Kuvan 71 mukaisesti, voidaan todeta KLV2:n vastapai-

neen olevan suoraan verrannollinen kaukolämmön menoveden lämpötilaan. Kuva 71 vahvistaa myös kaukolämmön menoveden lämpötilan ja KLV1:n vastapaineen välisen yhteyden. KLV1:n vastapaine vaihtelee kaukolämmön paluuedestä riippuen 0,2 barin vaihteluvälillä, mutta vastapaineen keskiarvo on riippuvainen menoveden lämpötilasta.



Kuva 72. Hanasaaren voimalaitoksen vastapaineiden ja kaukolämmön paluueden lämpötilan välinen yhteys tarkasteluvälillä 1.1.–31.7.2017.

Kuvassa 72 on esitetty kaukolämmönvaihdinten vastapaineiden ja kaukolämmön paluueden lämpötilan välinen yhteys. Paluueden ja vastapaineiden välillä ei tällaisella tarkastelulla löydetä suoraa yksiselitteistä yhteyttä. Molempien vaihdinten vastapaineet kuitenkin asettuvat taulukossa yhtäläiseen muotoon. KLV1:n ja paluueden kuvaajaan olisi mahdollista piirtää kaksi suoraan verrannollisuutta kuvaavaa trendiviivaa. Lämpötilojen ja vastapaineen välinen yhteys on huomattavissa kuitenkin vasta korkeammilla paluueden lämpötiloilla.



Kuva 73. Hanasaaren voimalaitoksen kaukolämpövesien lämpötilojen välinen yhteys.

Kuvassa 73 on esitetty kaukolämmön meno- ja paluueden lämpötilan välinen yhteys. Kaukolämmön paluueden lämpötila ei riipu suoraan menoveden lämpötilasta. Paluueden lämpötila on riippuvainen kulutuksesta ja menoveden lämpötila säädetään kulutuksen mukaan, joten paluueden lämpötila pysyy lähes riippumattomana menoveden lämpötilasta. Menoveden lämpötilan arvolla 85–88 °C paluueden lämpötilan arvot ovat

jakautuneet laajalle alueelle, koska kesällä kaukolämmön menoveden lämpötilaa ei laskettu alle 85 °C, mutta lämmön kulutuksen määrä on ollut suhteessa pienempi kuin muina vuodenaikoina.

5.1.2 Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamiskokeilu

Voimalaitoksen käyttäytymisen analysoimiseksi päätettiin järjestää kokeilu, jossa kaukolämmön menoveden lämpötilaa alennettaisiin mahdollisimman alas ja pidettäisiin alhaalla vähintään viikon ajan, jotta muutokset prosessissa pystyttäisiin havaitsemaan. Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamista on kokeiltu aiemmin. Aikaisemmassa kokeilussa lämpötilaa laskettiin vähitellen aste kerrallaan. Kokeilu kesti kolme vuorokautta, kunnes ilmeni ongelma, ettei kaukolämpöveden lämpötila ollut riittävä kaukojäähdytystä tuottavan Salmisaaren absorptiokoneen toimintaan. Kokeilun aikana Hanasaaren voimalaitos oli ainoa Helsingin verkossa tuotannossa ollut voimalaitos. Kaukolämmön menoveden lämpötila saatiin laskettua alimmilleen 83,5 °C:een. Kokeilun aikana huomattiin, että prosessiin syntyneet paine-erojen muutokset aiheuttivat ongelmia kaukolämmönvaihdinten lauhteiden kulkemisessa. Paine-erot eivät olleet riittävät, jotta lauhteet olisivat kulkeneet vaihdinten välillä, kun kaukolämmön menoveden lämpötila alitti 85 °C. Lauhteiden kulkeminen alhaisilla menoveden lämpötiloilla oletetaan toimivan, jos voimalaitoksen tehoa lasketaan. Ongelmaan keksittiin kuitenkin toinen ratkaisu, sunttaaminen, jossa venttiilin avulla osa kaukolämpövedestä ohitti KLV2:n. Jos verkoon päätetään ajaa alhaisempaa kaukolämmön menoveden lämpötilaa tulevaisuudessa, lauhteen kerääntymisen ehkäisyyn tulee kehittää kestävämpi ja käytännöllisempi ratkaisu. [86] Uuden kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamiskokeilun suunnittelussa varauduttiin ongelmiin lauhteiden kulkemisen kanssa. Ennakko-odotuksena oli, ettei turbiinissa näkyisi muutoksia, jos lauhteiden kulkeminen ratkaistaisiin sunttaamisella.

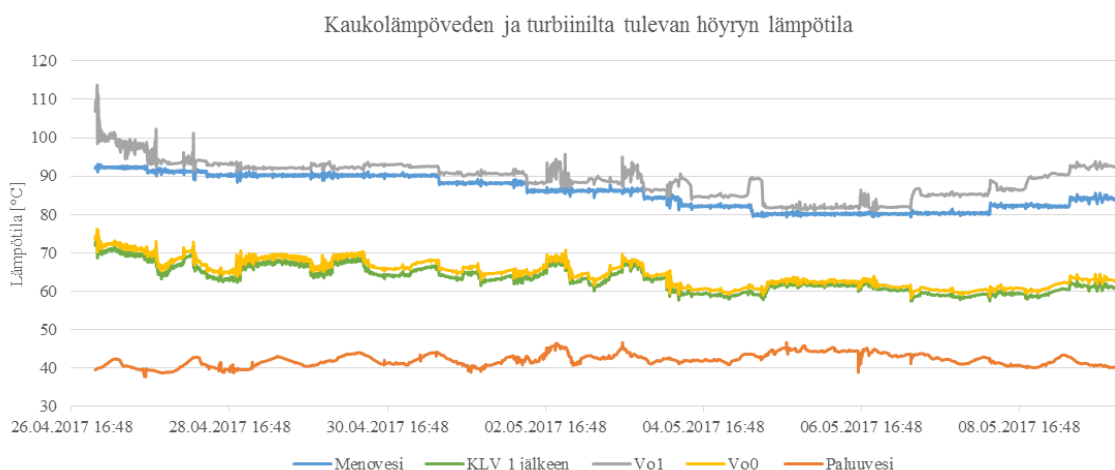
Kokeilun tarkoituksena oli alentaa menoveden lämpötila 80 °C:een. Edellisen kokeilun tuomien ongelmien vuoksi todettiin kokeilun vaativan, että Hanasaaren voimalaitoksen lisäksi myös Salmisaaren voimalaitos on ajossa. Näin voitiin taata, että Salmisaarella sijaitsevat absorptiokoneet saisivat 85 °C syöttöveden lämpötilan toimiakseen [26].

Kylmät ulkolämpötilat vaikuttivat kokeen suorittamiseen. Huhtikuussa 2017 lämpötilat olivat tavallista kylmemmät, joten kokeen suunniteltua alkua jouduttiin lykkäämään useaan kertaan. Huhtikuun keskilämpötila vuonna 2017 oli Helsingissä 2,3 °C ja vuonna 2016 4,9 °C [87]. Helsingissä vuorokauden keskilämpötila oli toukokuussa 9,9 °C, kun vuonna 2016 se oli 14,3 °C [88]. Kaukolämmön tarve oli kylmien kelien vuoksi edellisvuotta runsaampaa. Salmisaaren voimalaitoksen vuosihuolto oli suunniteltu alkavan toukokuussa, eikä kokeilua ollut mahdollista siirtää myöhemmäksi. 27.4.2017 kaukolämmön menoveden lämpötilaa alettiin laskea 92 °C:sta vaiheittain kaksi astetta päivässä. 5.5.2017 saavutettiin menoveden lämpötilan minimi 80 °C. Alhaisella menoveden lämpötilalla ajettiin kolme päivää, kunnes kokeilu päätettiin lopettaa kaukolämpöver-

kolla tapahtuvan epävakauden ja muiden ongelmien vuoksi. Kaukolämmön menoveden lämpötila nostettiin 8.5.2017 alkaen vaiheittain 86 °C:een.

Kokeilun lyhyestä kestosta huolimatta, voimalaitosten ja kaukolämpöverkon käyttäytymisestä saatiin kerättyä tulevaisuuden kannalta arvokasta tietoa. Kaukolämpöverkon käyttäytymisen havaittiin olevan erittäin epävakaa kokeilun aikana. Verkkoon syntyi paine-eroja, jotka vaikeuttivat verkon ajamista. Paine-erojen syntymiseen vaikutti eri voimalaitosten syöttämät erilaiset kaukolämmön menoveden lämpötilat. Paine-erojen oletetaan vähenevän, jos kaikilla laitoksilla menoveden lämpötila asetetaan yhtäläisiksi. Verkon ajaminen alemmilla lämpötiloilla vaatii suurempaa huomiota.

Kaukolämmön menoveden lämpötilan vaikutuksia pystyttiin tarkastelemaan eri menoveden lämpötiloilla kerätystä prosessidatasta. Kuten aikaisemman kokeilun aikana, kaukolämmönvaihdinten välille alkoi kerääntyä lauhdetta, kun menoveden lämpötila laskettiin alle 84 °C. Ongelma ratkaistiin ajamalla osa kaukolämpövedestä KLV2:n ohi, ajamalla Vo1:stä kuumempaa höyryä KLV2:lle ja sekoittamalla vaihtimen ohi kulkenut vesi KLV2:lta tulevaan kuumempaan kaukolämpövedeen.



Kuva 74. Hanasaaren voimalaitoksen kokeilun aikaiset kaukolämpöveden sekä Vo0:n ja Vo1:n höyryn lämpötilat.

Kuvassa 74 on esitetty kokeilun aikana kerättyä dataa kaukolämpövesien sekä kaukolämmönvaihtimille tulevien höyryjen lämpötiloista. Vo0:n höyryn lämpötilan muutokset korreloivat kaukolämmön paluuv veden muutosten kanssa. Vo1:n lämpötila myötäilee voimakkaasti kaukolämmön menoveden lämpötilaa, mutta tehon muutokset etenkin alhaisilla menoveden lämpötiloilla voidaan havaita Vo1:stä lähtevän höyryn lämpötilassa. Tehon muutokset muuttavat tulohöyryn lämpötilaa. Tehon voimakkaat nousut nostavat höyryn lämpötilaa, mutta tehon laskiessa huomattavan alas siipien tyhjän pyörinnän vaikutuksesta Vo1:stä KLV 42:lle lähtevän höyryn lämpötila nousee. Äkilliset tehosta johtuvat muutokset voidaan selittää sillä, että tehon laskiessa höyryn massavirran määrä turbiinissa laskee, jolloin turbiinin siivet pääsevät pyörimään vapaammin ja kuumenemaan [8].

Kokeilua pitäisi jatkaa selkeästi pidemmän ajanjakson ajan ja verkkoon syötetyn menoveden lämpötila tulisi olla kaikkialla verkossa sama, jotta olisi odotettavissa menoveden lämpötilasta riippuvia selkeitä paluuveden lämpötilan muutoksia. Menoveden lämpötilan ollessa alhaisempi, verkolla tapahtuvien lämpöhäviöiden määrä on vähäisempää ja näin lämmönsiirto on energiatehokkaampaa. Paluuveden lämpötilan ei voida olettaa kylmenevän yhtä paljon kuin menoveden lämpötilaa lasketaan.

Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin käyttäytymisen analysoimiseksi Rasila ja Grönroos [89] loivat Hanasaaren voimalaitoksen prosessiautomaatioon elementin, joka näyttää reaaliaikaisesti laskennallisen turbiinin kosteuden. Laskennat suoritetaan turbiinin tulohöyryn paineen ja lämpötilan sekä kaukolämmönvaihtimen vastapaineen funktiona. Simuloimalla kokeilun aikaisia hetkellisiä tyypillisiä tilanteita pystytään arvioimaan turbiinin laskennallisia kosteuspitoisuuksia todellisten prosessiarvojen perusteella.

Taulukko 16. Vo0:n kosteudet Hanasaaren voimalaitoksen menoveden lämpötilan alentamiskokeilun aikana [86].

Kaukolämmön menoveden lämpötila (°C)	Kaukolämmön paluuveden lämpötila (°C)	Teho (MW)	Vo0 laskennallinen kuivan höyryn osuus (%)
90	41	117	88,52
88	41	108	90,39
88	39	93	91,72
86	46	80	92,99
86	43	115	89,58
86	43	90	91,60
86	44	76	92,84
84	42	82	92,12
82	42	117	88,47
82	42	98	89,59
82	42	103	89,42
80	43	117	88,70
80	45	74	92,54
80	41	98	90,05

Taulukossa 16 on esitetty kokeilun aikaiset laskennalliset Vo0:n kosteuspitoisuudet eri kaukolämpöveden arvoilla ja tehoilla. Taulukon otokset ovat hyvin hajanaisia, mutta tarkastelemalla taulukon arvoja ja kokeilun aikana kerättyä prosessidataa, voidaan todeta, että kaukolämpöveden menoveden lämpötilalla ei näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta Vo0:n kosteuspitoisuuteen näin lyhyellä tarkasteluvälillä. Tämän tarkastelun perusteella kaukolämpövesien lämpötiloja suurempi vaikutus Vo0:n kosteuspitoisuuteen on voimalaitoksen sähköteholla. Alemmalla teholla ajettaessa turbiinin loppupään kosteus pienenee. Tämän voidaan katsoa johtuvan kahdesta syystä: Turbiinista saatavan te-

hon määrää säädetään laskemalla tulohöyryn painetta, lämpötilaa pudotetaan tehon mukana vähän tai ei ollenkaan, minkä seurauksena turbiinin paisuntakäyrä siirtyy Mollier-diagrammissa oikealle ja turbiinin loppupää ei pääse yhtä kosteaksi, vaikka vastapaine pidettäisiin vakiona. Toinen syy on turbiinissa paisuvan höyryn vähäisempi määrä. Höyryn määrän ollessa vähäinen turbiinin siivet pääsevät pyörimään vapaammin, mikä nostaa höyryn paikallista lämpötilaa [86]. Tämän laskennan perusteella vo0:n kosteuspi-toisuudet olivat odotettuja korkeampia.

Vo1:ssä höyrynpaine laski kaukolämmön menoveden lämpötilan laskiessa. Myös höyryn lämpötila laski, pois lukien matalan tehon ajo, jolloin massavirran pieneneminen aiheutti nopean lämpötilan nousun. Paineiden ja lämpötilojen laskiessa höyrynkosteus kasvoi. Kosteus kasvoi lähes suoraviivaisesti menoveden lämpötilan laskun suhteen. Kun menoveden lämpötila alitti 84 °C, jouduttiin osa kaukolämpövedestä ohittamaan KLV2 ja sunttamaan verkkoon vietävään veteen kylmempää vettä. Näin ollen KLV2:sta tuleva vesi oli todellisuudessa kuumempaa kuin verkkoon ajettu vesi ja vaihtimelle tuleva höyry oli kuivempaa. Kaukolämpöveden lämpötilan mittapisteissä ei sunttausta havaita, mikä vääristää kerättyä mittausdataa. Teoreettinen kosteus Vo1:ssä saadaan kuitenkin laskettua mittausdatan perusteella ja siitä voidaan todeta, että sunntauksen ansios-ta turbiinin kosteus ei nouse Vo1:ssä.

Taulukko 17. *Kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamisen vaikutus Vo1 höyryn kosteuteen. Menoveden lämpötilan ollessa alle 84 °C, aloitettiin sunntaus. [86]*

Kaukolämmön menoveden lämpötila (°C)	Teho	Vo1 laskennallinen kuivan höyryn osuus
90	117 MW	93,93 %
88	117 MW	93,49 %
86	117 MW	93,15 %
84	117 MW	93,05 %
82	117 MW	93,10 %
80	117 MW	93,19 %

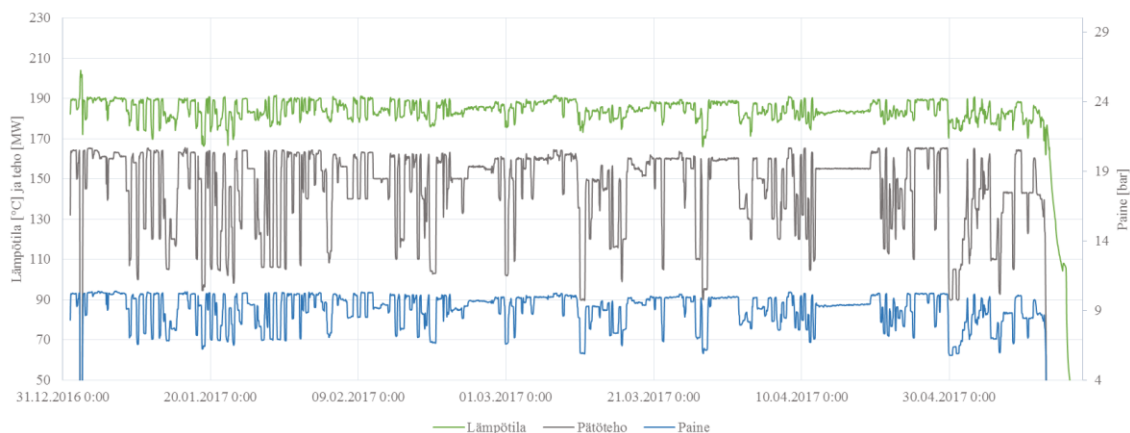
Vertaamalla Taulukon 16 ja Taulukon 17 kosteuspi-toisuuden arvoja turbiinin mahdollisiin paisuntakäyriin, voidaan todeta, että taulukon arvot pätevät hyötysuhteen avulla laskettuun turbiinin paisuntaan vain jos tulohöyryn lämpötila olisi alle 500 °C ja paine yli 60 bar. Kattilan automaatio ei salli vp-turbiinin tulohöyryn laskemista alle 500 °C ja välitulistimen varoventtiilit aukeavat noin 57 barin paineessa. Väliottojen kosteuspi-toisuudet on laskettu vertaamalla paisunnan alkua- ja lopputilojen laskennallisia entropioita [86]. Entropian muutos on laskettu höyryn faasimuutoksen entropiana. Turbiinin paisuntakäyrän entropian muutos on määritetty turbiinin entalpian muutoksen ja hyötysuhteen avulla. Entalpia ja entropia ovat suureita, joiden absoluuttista arvoa ei voida mitata. Kosteaa höyryä entalpian muutos määritetään talteen otetun energian avulla, höyryturbiinin tapauksessa entalpian muutos saadaan turbiinin tuottamasta tehosta. Kun kostean höyryn entalpian muutos määritetään hyötysuhteen avulla, saatu tulos on epätarkka ja

sisältää mahdollisen virheen. Määrittäksessä oletetaan, että kaikki energia, jota ei saada muutettua sähköksi, häviää turbiinin paisunnan yhteydessä. Todellisuudessa energiahäviöitä syntyy myös energian talteenotossa. Höyryn paisunnan entropian muutoksen ei kuitenkaan voida olettaa paisuvan ideaalisti. Paisuessaan turbiinissa höyry luovuttaa lämpöenergiaa turbiinin komponenteille, mikä vähentää käytettävissä olevan entalpian määrää höyryssä. Paisuessaan turbiinin siivissä höyryn ja siiven pinnan välille syntyy kitkaa, mikä myös pienentää höyryn energiaa. Lisäksi, höyry työntää juoksusiipiä pyörimään; jos roottori pyörisi turbiinissa täysin kitkattomasti, hukkaenergian määrä olisi erittäin vähäinen. Todellista turbiinin kosteuspitoisuutta ei voida määrittää ilman turbiiniin asennettavia kosteutta mittaavia antureita. Todellinen kosteuspitoisuus on jotain Taulukossa 16 ja Taulukossa 17 esitettyjen arvojen ja hyötysuhteen avulla määritetystä paisuntakäyrästä saatavan kosteuspitoisuuden välillä. Gua ym. [90] ovat tutkineet hyötysuhteen avulla määritettyjen kosteuspitoisuuksien eroja mitattuihin kosteuspitoisuuksiin. Heidän tutkimustensa perusteella hyötysuhteen avulla määritetty kosteuspitoisuus on hieman mitattua kosteuspitoisuutta alhaisempi. Mitattu ja hyötysuhteen avulla määritetty kosteuspitoisuus ovat kuitenkin niin lähellä toisiaan, että kosteuspitoisuuden arvioinnissa voidaan käyttää hyötysuhteen avulla määritettyä arvoa. Tavallisissa ajotilanteissa todellisen kosteuspitoisuuden voidaan olettaa olevan aina vähintäänkin niin paljon kuin hyötysuhteen avulla määritetty kosteus.

Vaikka Taulukon 16 ja Taulukon 17 arvot eivät sovellu todellisen kosteuspitoisuuden arviointiin, niitä voidaan käyttää apuna arvioitaessa kaukolämmön menoveden lämpötilan vaikutusta turbiinin kosteuspitoisuuteen. Menoveden lämpötilan optimoinnin vaikutuksia arvioidessa oleellista on ymmärtää turbiinin vastapaineiden riippuvuus kaukolämpövesien lämpötiloista. Vastapaineiden ja kaukolämpöveden lämpötilojen välistä yhteyttä analysoitiin kappaleessa 5.1.1.

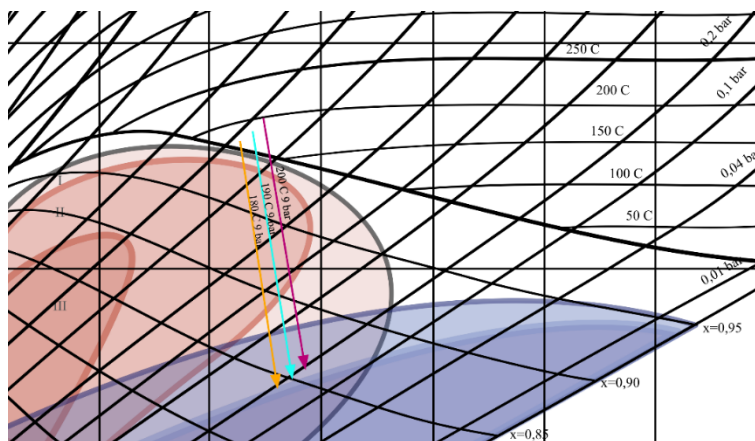
5.2 Turbiinin paisunnan riippuvuus tulohöyryn parametreista

Turbiinin paisunnan sijainnilla Mollier-diagrammissa on todettu olevan vaikutus materiaaliongelmiin esiintymiseen turbiinissa. Paisuntakäyrän sijaintiin vaikuttavat turbiinin tulohöyryn lämpötila ja paine. Tässä kappaleessa on tarkasteltu tulohöyryn parametrien vaikutusta Helen Oy:n voimalaitosten vastapaineturbiinien paisuntakäyrien sijaintiin Mollier-diagrammissa. Ajettaessa pienellä teholla turbiinin tulohöyryn lämpötilaa ja/tai painetta muutetaan. Jos tehomuutoksessa painetta säädetään alemmas, mutta tulohöyryn lämpötila pidetään vakiona, höyrynkosteus turbiinissa laskee. Taas jos tulohöyryn lämpötilaa lasketaan, höyrynkosteus nousee.



Kuva 75. Salmisaaren voimalaitoksen tulohöyryn lämpötilat ja paineet sekä päätöteho keväällä 2017.

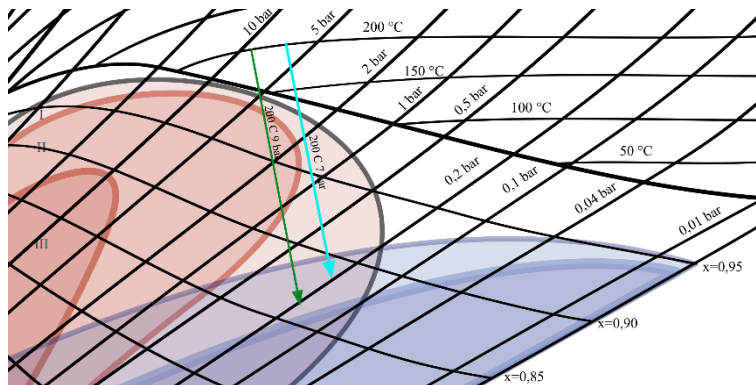
Kuvassa 75 on esitetty Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn prosessidaataa. Tehon muutokset vaikuttavat tulohöyryn parametreihin. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn arvot täydellä teholla tyypillisesti $\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja 10 bara (9 barg); pienellä teholla 170–175 $^{\circ}\text{C}$ ja 5–7 bara (6 barg). Salmisaaren välipaineturbiinin tulohöyryn paluuveden lämpötilan vaikutus turbiinin paisuntakäyrään Mollier-diagrammissa on esitetty Kuvassa 76.



Kuva 76. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrät tulohöyryn lämpötiloilla 180 $^{\circ}\text{C}$, 190 $^{\circ}\text{C}$ ja 200 $^{\circ}\text{C}$ 9 bar paineella.

Tulohöyryn lämpötilan laskeminen vie turbiinin paisuntakäyrää pidemmälle eroosiokorroosion alueelle. Kaukolämmön paluuveden lämpötilan lasku lisää vesipisara eroosion määrää Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa. Tulohöyryn paineen ollessa 9 bar, kaukolämmön paluuveden lämpötilan tulisi olla yli 55 $^{\circ}\text{C}$ (paisuu 0,39 bariin) ja turbiinin tulohöyryn lämpötilan yli 200 $^{\circ}\text{C}$, jotta turbiinin loppupään vesipisaraeroosiolta välttyttäisiin. Vastaavasti: kun tulohöyryn lämpötila on 190 $^{\circ}\text{C}$, kaukolämmön paluuveden lämpötilan tulisi olla vähintään 60 $^{\circ}\text{C}$ (paisuu 0,47 bariin) ja tulohöyryn ollessa 180 $^{\circ}\text{C}$ kaukolämmön paluuveden lämpötila pitäisi olla vähintään 61 $^{\circ}\text{C}$ (paisuu 0,5 bar asti).

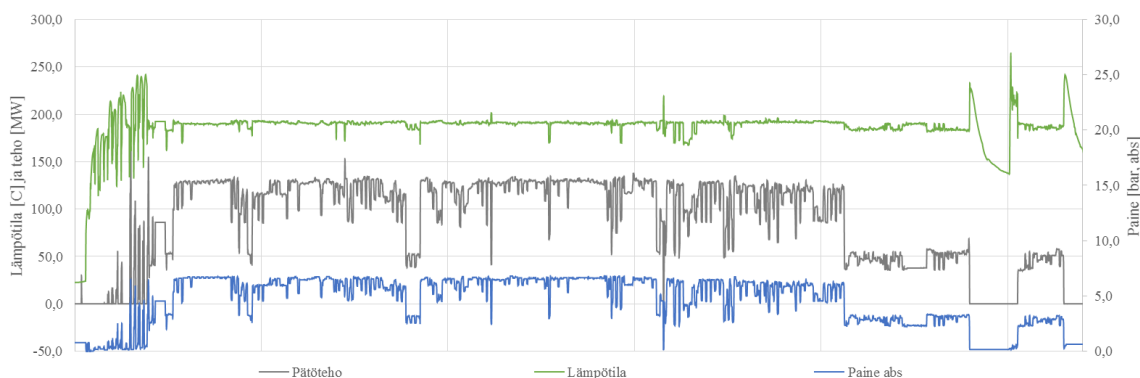
Voimakkaan eroosiokorroosioalueen välttämiseksi Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisuntakäyrän sijaintia Mollier-diagrammissa tulisi saada siirrettyä oikealle. Tämä on mahdollista joko pudottamalla tulohöyryn painetta tai nostamalla höyryn lämpötilaa.



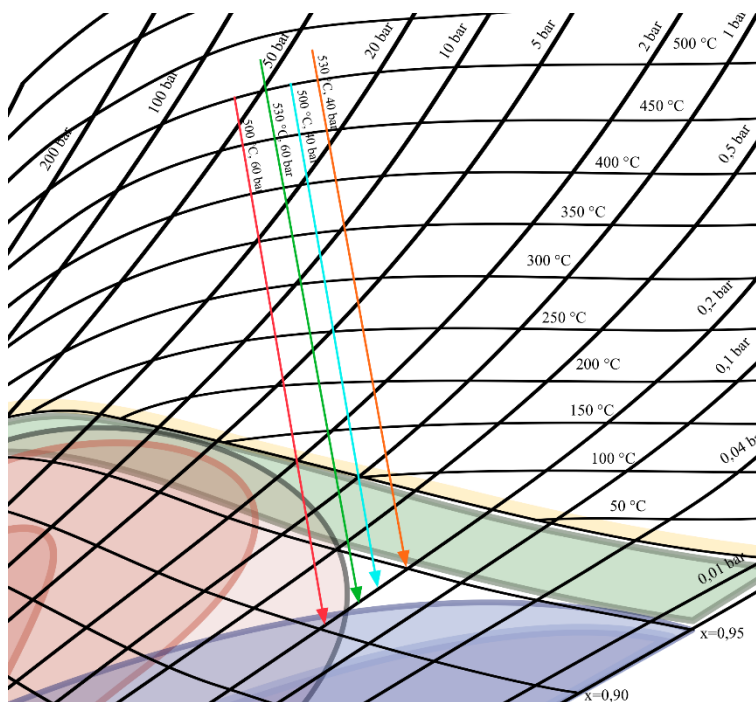
Kuva 77. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrät tulohöyryn ollessa 200 °C ja 9 bar sekä 200 °C ja 7 bar.

Kuvassa 77 esittää Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan tulohöyryn lämpötilan ollessa 200 °C ja paineen 7 tai 9 bar. Vaikean eroosiokorroosion alue voidaan välttää, kun asetetaan tulohöyryn arvoiksi 200 °C ja 7 bar. Koska kyseessä on vastapaineturbiini ja kaukolämmönvaihtimen vastapaine riippuu kaukolämmön paluuveden lämpötilasta, saatavan sähkötehon määrä riippuu kaukolämmön paluuveden lisäksi tulohöyryn arvoista. Pitämällä tulohöyryn lämpötila vakiona, saatavan sähkötehon määrä laskee, kun tulohöyryn painetta alennetaan. Jos turbiinista halutaan saada vastaava teho kuin voimakkaan eroosiokorroosion alueella tapahtuvasta paisunnasta, tulee tulohöyryn lämpötilaa nostaa.

Vuosaaren B-voimalaitos on suunniteltu mahdollistamaan alhaiset kaukolämmön menoveden lämpötilat. Alhaisesta sähkön hinnasta ja maakaasulle tulleesta lisäverosta johtuen, viime vuosina Vuosaaren voimalaitosta on ajettu aikaisempia vuosia vähemmän ja pienemmillä tehoilla.



Kuva 78. Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn arvot ja pätöteho, 10/2016–5/2017.



Kuva 81. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnat tulohöyryn arvoilla 500 °C ja 60 bar, 530 °C ja 60 bar, 500 °C ja 40 bar sekä 530 °C ja 40 bar.

Kuvassa 81 on esitetty Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisuntakäyrien sijainnin riippuvuus tulohöyryn lämpötilasta ja paineesta. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn lämpötilan tulisi olla alle 500 °C tai paineen 60 bar, jotta paisuntakäyrä sijoittuisi eroosiokorroosion riskialueelle. Koska tulohöyryn lämpötila ei voi laskea alle 500 °C, paisuntakäyrä voi siirtyä eroosiokorroosion alueelle vain, jos painetta nostetaan tarpeeksi korkeaksi. Tulohöyryn paine ei voi nousta 60 bariin, sillä välitulistimen varoventtiilit aukeavat, kun höyrynpaine on noin 57 bar. Kuvassa esitetyt paisuntakäyrät, joissa tulohöyryn lämpötilat ovat 500 °C sekä 530 °C ja paineet 60 bar, eivät siis ole mahdollisia. Jos turbiinin höyryn paisunnan todettaisiin olevan lähempänä isentrooppista paisuntaa kuin hyötysuhteen avulla laskettua paisuntaa, paisuntakäyrä sijoittuisi herkemmin eroosiokorroosion alueelle.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaukolämmön menoveden lämpötilan optimoinnin on todettu tuottavan merkittävät säästöt kaukolämpöverkon lämpöhäviöiden minimoituessa. Alhaisen kaukolämmön menoveden lämpötilan todettiin tekevän kaukolämpöverkon ajamisesta epävakaata kasvaneiden paine-erojen seurauksena. Kaukolämpöverkon käyttäytyminen todennäköisesti tasaantuisi, jos kaikilla voimalaitoksilla ja lämpökeskuksilla kaukolämpöverkkoon ajettaisiin menovettä yhtäläisellä lämpötilalla. Kaukolämmön menoveden lämpötilan laskemisen todettiin alentavan höyryturbiinin vastapaineita, minkä seurauksena turbiinin kosteus nousi. Turbiinin kosteuden nousu lisää vesipisaraeroosion riskiä höyryturbiinissa.

Turbiinien prosessidatan ja paisuntakäyrien tarkastelu osoittaa, että kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamista suurempi vaikutus on kaukolämmön paluuveden lämpötilalla sekä turbiinille tulevan tulohöyryn arvoilla. Paluuveden lämpötila vaikuttaa turbiinin Vo0:n vastapaineisiin. Paluuveden lämpötilan lisäksi menoveden lämpötilalla todettiin olevan vaikutus Vo0:n vastapaineeseen. Kun kaukolämmön paluu- ja menovesien lämpötilat ovat yhtä aikaa alhaalla, turbiinin Vo0:n vastapaine on minimiarvossa. Koska vastapaineen alentaminen nostaa kosteutta turbiinissa, materiaalien kulumisen riski kasvaa, kun kaukolämpövesien lämpötilat laskevat. Kahteen suuntaan paisuvissa turbiineissa Salmisaaren ja Vuosaaren B-voimalaitoksilla kaukolämmön menoveden lämpötila vaikuttaa siihen, kuinka pitkälle Vo1:ssä höyry paisuu. Vo0:ssa paisuminen tapahtuu Vo1:tä pienempiin paineisiin ja riski vesipisaraeroosiolle kasvaa. Materiaalien kestävyys kannalta Vo0:n tarkastelemisen avulla voidaan määrittää turbiinien sallimat arvot. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiineissa paisunta tapahtuu yhteen suuntaan, mutta niidenkin osalta tarkastelu voidaan keskittää Vo0:aan.

Koska kaukolämpövesien alhaisempi lämpötila laskee turbiinin vastapainetta, turbiinin rakennusaste kasvaa, kun kaukolämmön menoveden lämpötilaa alennetaan. Vaikka turbiinin kosteuden nousu vähentää turbiinin jakson hyötysuhdetta, sähkötehon oletetaan kasvavan kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamisen myötä. Jos kaukolämmön menoveden lämpötiloja päätetään laskea, vastapaineturbiinien ja kaukolämmönvaihtimien tiloja tulee tarkkailla. Kosteuden nousu voi lisätä turbiinien ja kaukolämmönvaihtinten materiaalien kulumista. Tutkimuksissa turbiinin vastapaineen muutosten vaikutuksen todettiin riippuvan turbiinin paisunnan sijainnista Mollier-diagrammissa. Vastapaineiden lisäksi turbiinien materiaalien keston vaikuttaa eroosiokorroosion ja kaksifaasisen FAC:n ilmeneminen.

Tässä luvussa on arvioitu tehtyjen tutkimusten perusteella miten eri materiaalit kestävät erilaisia kostean höyryn olosuhteita. Lisäksi tässä luvussa on määritetty minkälaisia turbiinin tulohöyryn lämpötilan ja paineen tulisi olla, jotta materiaalien kulumisen saataisiin minimoitua. Turbiinin paisunnan sijainnin perusteella pystytään myös arvioimaan, kuinka alas turbiinin vastapaine voidaan laskea eri tulohöyryn arvoilla.

Voimalaitosten komponenttien materiaaleille haastavin hetkittäinen tilanne on silloin, kun kaukolämmön menoveden lämpötila on laskettu alas ja kaukolämmön paluueden lämpötila on matala. Jos kesällä kaukolämmön menoveden lämpötila laskettaisiin noin 80 °C:seen, kaukolämmön paluueden lämpötilan oletetaan laskevan. Kuten toukokuussa tehdyssä kokeilussa huomattiin, turbiinin Vo0:n vastapaine voi laskea alle 0,2 bariin. Vastapaineen laskeminen aiheuttaa höyrynkosteuden nousun.

Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa päätetään laskea, tarkkoja seurauksia on vaikea arvioida, koska ennen pidempiaikaisia kokeiluja ei voida varmaksi sanoa, kuinka kaukolämpöverkko käyttäytyy. Voimalaitoskomponenttien asettamat rajoitteet riippuvat pitkälti kaukolämmön paluueden muutoksista. Voimalaitoksissa ensimmäisten kaukolämmönvaih dinten vastapaineet ovat alhaisimmillaan, kun kaukolämmön paluueden lämpötila on alhainen yhtä aikaa menoveden lämpötilan kanssa. Hanasaaren kaukolämmön menoveden lämpötilaan liittyvän kokeilun aikana alhaisin KLV1:n vastapaine saavutettiin kaukolämmön menoveden arvolla 82 °C ja paluueden ollessa 41 °C (0,18 bar). Vaikka oletuksena on, että kaukolämmön menoveden lämpötilan laskeminen alentaa myös paluueden lämpötilaa, on mahdollista, että verkko käyttäytyy päinvastaisesti ja paluueden lämpötila nousee. Jos käy ilmi, että kaukolämmön menoveden lämpötilan laskemisen jälkeen, paluueden lämpötila ei laske, kestävät voimalaitoksen komponenttien materiaalit odotettua paremmin kaukolämmön menoveden lämpötilan laskun. On kuitenkin huomioitava, että myös menoveden lämpötila vaikuttaa KLV1:n paineeseen, näin ollen vaikka kaukolämmön paluueden lämpötila pysyisi aina yli 40 °C, kaukolämmön menoveden ollessa alhainen, vastapaine voi laskea alle 0,2 barin.

Jos kaukolämmön menoveden optimointi suoritetaan sunttaamalla, voimalaitosten komponentteihin vaikuttavat eniten paluueden lämpötilan muutokset. Jos prosessiin tehdään muutoksia, jotka mahdollistavat alhaisen menoveden lämpötilan ilman sunttausta, vaikutukset voimalaitosten komponenttien materiaaleihin ovat merkittävämmät. Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa päätetään laskea, riippumatta lämpötilan laskun menetelmästä, oleellista on tarkkailla turbiinien vastapaineita.

Todellisuudessa turbiinin paisuntakäyrä ei ole suora, sillä esimerkiksi väliottojen kohdalla kosteuden määrä saattaa vähentyä. Aktioturbiineissa juoksusiivet eivät muuta höyryn painetta, mutta höyryn kulkiessa juoksusiivissä höyryn käytettävissä olevan entalpian määrä pienenee ja entropian määrä kasvaa. Osa muodostuneista pisaroista saattaa höyrystyä uudelleen juoksusiipien pinnoilta. Arvioitaessa turbiinin paisuntaa, kosteuspi-toisuuksia ja materiaalien riskialueita, voidaan käyttää paisuntakäyrästä yksinkertaistet-

tua suoraviivaista mallia. Arviointeja tehdessä on kuitenkin huomioitava, että Mollier-diagrammiin merkityt materiaaleille haastavat alueet ovat arvioita, eivätkä ole jokaiselle turbiinille yhtenevät. Vesikemian laadun ja käytettyjen kemikaalien vaikutuksesta haastaviksi merkittyjen alueiden sijainti ja materiaalien kulumisen voimakkuus vaihtelevat.

Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin ongelmilta ei voida välttyä, vaikka kaukolämmön menoveden lämpötilaa ei laskettaisi. Vastapaineen nosto aiheuttaa Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrän sijoittumisen laajasti vakavan eroosiokorroosion alueelle. Korkea vastapaine nostaa turbiinin loppupään lämpötilaa. Turbiinin loppupään lämpötilan nousu kasvattaa magnetiitin liukoisuutta. Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa lasketaan, johtosiipikiekoissa ilmennyt eroosiokorroosio keskittyy pienemmälle alueelle ja esiintyy lievempänä turbiinin loppupäässä. Kosteuden nouseminen kuitenkin lisää kaksifaasisen FAC:n ja vesipisaraeroosion määrää.

Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän havaittiin altistuneen laajasti eroosiokorroosiolle, vaikka turbiinin paisunnan loppupää ei sijoitu Mollier-diagrammissa vakavan eroosiokorroosion alueelle. Vastaavaa kulumista havaittiin myös Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten vastapaineturbiinien tutkintojen yhteydessä. Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiinien materiaalien kulumisen oli Salmisaaren voimalaitoksen turbiinia maltillisempaa. Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiinien paisunnat sijoittuvat Mollier-diagrammissa alueelle, jossa eroosiokorroosion riski on huomattavasti Salmisaaren voimalaitoksen turbiinia pienempi. Vuosaaren voimalaitoksen turbiinin paisunta osuu Mollier-diagrammin alueelle, jossa eroosiokorroosion riski on lievä, mutta Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin tulohöyryn lämpötila ja paine eivät selitä pesien kulumiseen liittyvää ilmiötä. Kulumisen voidaan selittää eroosiokorroosioon rinnastettavalla virtauksen kiihdyttämällä korroosiolla, FAC:lla. Turbiinien tapauksessa kyse on kaksifaasisen virtauksen aiheuttamasta FAC:sta. Kaksifaasisen virtauksen FAC yhdistää ilmiönä eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion. Höyrynvirtauksen sisältämät vesipisarat pyörteilevät turbiinin pesän pinnalla kuluttaen pinnan magnetiittia. Magnetiitin kulumisen altistaa perusaineen eroosiokorroosion tavoin kulumiselle. Höyrynkosteuden lisääntyminen kasvattaa pisaroiden kokoa ja määrää, mikä lisää FAC:in voimakkuutta. Koska ilmiö on rinnastettavissa eroosiokorroosioon, tiedetään, että samat materiaalit, jotka eivät kestä eroosiokorroosiota, ovat alttiita myös FAC:lle. Lisäksi turbiinin muodoilla on merkitystä virtausten aiheuttaman eroosion esiintymiseen. Laitteessa olevat kulmat ja muut jyrkät muodot kiihdyttävät höyryn pyörteilyä, mikä kasvattaa eroosion määrää. Suunnittelemalla laitteet muodoiltaan pyöreiksi pystytään vähentämään höyryn pyörteilyä ja eroosiota. Vanhaan turbiinin verrattuna Salmisaaren välipainepesä on muodoiltaan virtaviivaisempi, mikä pienentää eroosioriskiä aiempaan verrattuna.

Eroosiokorroosio ja FAC eivät vaikuta turbiinin juoksusiipiin. Kosteuden nousu turbiinin loppupäässä lisää viimeisten juoksusiipien kulumista vesipisaraeroosion muodossa. Jos vastapainetta pienennetään, turbiini pääsee paisumaan pidemmälle vesipisaraeroosion alueelle. Pisaroiden iskeytymisvoima muuttuu hieman höyrynnopeuden kasvun seu-

rauksena. Myös paineen laskun aiheuttama pisan tiheyden kasvu nostaa pisan aiheuttamaa painetta. Pisan iskeytymisnopeuteen vaikuttaa merkittävästi siipien pyörimisnopeudesta riippuva komponentti, jonka voidaan katsoa olevan vakio. Pisan siipiin aiheuttama voima ei muutu merkittävästi, mutta pisan koko ja iskujen määrä kasvavat kosteuden kasvaessa. Alhaisemmilla kosteuksilla merkittävä osa pisaista on niin pieniä, etteivät niiden siipeen kohdistama voimat aiheuta siivissä materiaalmuutoksia. Kun johtosiipien pinnoille kerääntyneet vesikalvot kasvavat paksuutta, niistä pääsee irtoamaan enemmän karkeitä, eroosiota aiheuttavia pisaroita. Kuten vesipisaraeroosion vertailuarvojen laskuista voidaan päätellä, muutaman prosentin kosteuden nousu yhdessä paineen laskun kanssa voi moninkertaistaa vesipisaraeroosion määrän. Vesipisaraeroosion vaikutukset ovat näkyvillä jo nykyisillä kosteuksilla, joten kosteuden kasvaessa ja paineen laskiessa viimeisten juoksusiipien kulumisesta voi tulla merkittävää, kun karkeiden pisan määrän kasvaa.

Kaikkien Helen Oy:n voimalaitosten vastapaineturbiinien juoksusiipien materiaaleina on käytetty martensiittisiä X12Cr13 ja X22CrMoV12-1 -teräksiä. Siipien kärkiin kohdistuvaan vesipisan aiheuttamaan paineeseen vaikuttaa juoksusiipien kärjen nopeus. Materiaalien vesipisaraeroosion keston arvioinnissa on käytetty Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin juoksusiipiä. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin juoksusiipien kunto päästiin tutkimaan vuosihuollon 2017 aikana. Koska jaksojen 4a ja 5a juoksusiipien kärjissä havaittiin merkkejä vesipisan iskuista, voitiin arvioida siipien kärjen liikkuneen vesipisaraeroosion riskialueella. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin tutkimusten yhteydessä laskettiin arvio siipien kärkiin kohdistuvasta paineesta. Arvioitua painetta voidaan verrata siipien materiaalien lujuuksiin. Kun iskun siipeen kohdistama paine on siiven materiaalin myötölujuutta suurempi, pisan isku aiheuttaa siivessä plastista muodonmuutosta. Viimeisten juoksusiipien kärkiin on tehty suoja pisaraeroosiota vastaan.

Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiivet ja viimeisiä lukuun ottamatta juoksusiivet on valmistettu X12Cr13 -teräksestä, jonka kimmomoduuli 100 °C:ssa on 212000 MPa. Viimeiset ovat X22CrMoV12-1 -terästä, sen kimmomoduuli 100 °C:ssa on 209000 MPa [50]. Pisan viimeisiin juoksusiipiin aiheuttama paine 727 MPa ylittää siipien materiaalin X22CrMoV12-1 tyyppillisen myötölujuuden 675 MPa [73]. 0,2 % myötöraja tälle teräkselle 100 °C on noin 570 MPa ja murtolujuus 20 °C 800–950 MPa [50]. Jakson 4a juoksusiivet on valmistettu X12Cr13 -teräksestä. Tämän työn arvioiden mukaan niihin kohdistuu vesipisaista 608 MPa paine. Kyseisen teräslaadun murtolujuus karkaistuna ja päästettynä (+QT) on 650–850 MPa ja 0,2 % myötöraja 100 °C:ssa 420 MPa [50]. Pisan siipien kärkiin kohdistama paine on aiheuttanut siipien kärkeen plastista muodonmuutosta, mikä täsmää laskennallisesti arvioituun paineen voimakkuuteen. Pisanat eivät ole merkittävästi vahingoittaneet juoksusiipiä. Paineen lasku ja kosteuden nousu ennen juoksusiipiä lisää vesipisaraeroosion määrää.

Työssä lasketut pisaroiden aiheuttamat paineet ovat arvioita, jotka sisältävät monia epävarmoja muuttujia. Siipien kärkiin kohdistuvat paineet on arvioitu käyttämällä iskeytymisnopeutena siiven kärjen nopeutta. Arviossa on oletettu, että pisarat iskeytyvät siiven kärkeen kohtisuoraa. Todellisuudessa pisaran iskeytymisnopeus riippuu pisaran iskeytymiskulmasta ja pisaran nopeuden suhteesta siiven kärjen nopeuteen. Lasketuissa paineissa ei ole otettu huomioon pisaraan muodostuvan shokkiaallon aiheuttamaa painetta. Shokkiaallon paineen voidaan arvioida lähes kaksinkertaistavan materiaalin kohdistuvan paineen. Käyttämällä Heymannin esittämää kaavaa, joka ei ota huomioon shokkiaallon aiheuttamaa painetta, siiven kärkiin kohdistuvan kohtisuoran paineen voidaan olettaa olevan oikeassa kokoluokassa. Materiaalin lujuuksia ja laskennallista iskeytymispainetta vertaamalla ei voida arvioida vesipisaraeroosion laajuutta, koska iskeytymispaine on riippumaton kosteudesta ja pisaroiden koosta. Pisaraeroosio on riippuvainen pisaroiden koosta ja määrästä. Eri materiaalien vesipisaraeroosion määrän arviointiin voidaan käyttää kappaleessa 4.2.2 NER-arvojen avulla laskettuja vesipisaraeroosion asteita. Koska pisaroiden kokoa ei tiedetä, eroosioasteet laskettiin neljän eri pisarakoon avulla. Todellista eroosionastetta ei tiedetä, mutta arvoja voidaan käyttää vertaillessa eri materiaalien vesipisaraeroosionkestoja. Salmisaaren turbiinin materiaaleista viimeisten juoksusiipien materiaali X22CrMoV12-1 kestää vesipisaraeroosiota tutkituista materiaaleista parhaiten. Siiven kärjen vahvistettu osuus kestää vesipisara eroosiota muuta siipiä paremmin. Muiden juoksusiipien materiaalin X12Cr13 vesipisaraeroosioaste on lähes kaksinkertainen X22CrMoV12-1 materiaaliin verrattuna kaikilla vesipisarakoilla. Salmisaaren turbiinin staattiset komponentit kestävät vesipisaraeroosiota huomattavasti huonommin kuin siipien ruostumattomat teräkset. S355J0:n vesipisaraeroosion aste on yli kolminkertainen ja S235JR:n aste yli viisinkertainen X22CrMoV12-1:n arvoon verrattuna.

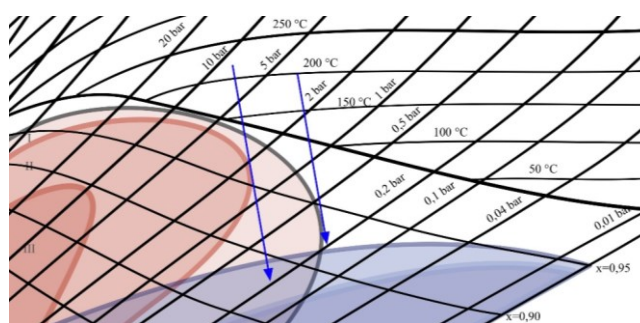
Jos turbiinin kuormitusta vähennetään maksimista, alue, jolla vesipisaraeroosiota esiintyy, voi muuttaa paikkaa. Myös kaukolämmönvaihtimissa tapahtuvien vastapaineen muutosten on havaittu vaikuttavan, sillä erilaiset virtaukset voivat kohdistaa eroosion muillekin alueille kuin siipien kärkiin; esimerkiksi siiven jättöreunalle tai siiven juureen. Vastaavasti vesipisaraeroosion esiintyminen voi poiketa tyypillisestä tilanteesta, jos turbiiniin joudutaan ruiskuttamaan prosessin käydessä vettä ylikuumenemisen estämiseksi. [30]

Turbiinin tulohöyryn parametrien säätäminen muuttaa turbiinin paisunnan sijaintia Mollier-diagrammissa. Jos tehonlaskun yhteydessä tulohöyryn lämpötilaa lasketaan, mutta paine pidetään vakiona, turbiinin paisuntakäyrä siirtyy diagrammissa vasemmalle. Eroosiokorroosion määrä kasvaa, jos turbiinin paisuntakäyrä siirtyy vasemmalle, koska kostean höyryn lämpötila nousee ja magnetiitin liukoisuus kasvaa. Samalla kosteuspiitoisuus turbiinissa kasvaa. Tehoa säädettäessä turbiinille suotuisinta olisi, että tulohöyryn lämpötila pidetään vakiona ja painetta lasketaan. Jos tulohöyryn lämpötilaa säädetään alemmas, höyryn paineen tulee laskea lämpötilan mukana niin, ettei paisunta-

käyrä siirry Mollier-diagrammissa vasemmalle. Tulohöyryn lämpötilan ja paineen samanaikainen laskeminen tuo paisuntakäyrän alkupistettä alaspäin, siirtäen kosteanhöyryn alueen alkamista lähemmäs paisunnan alkua. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin välipainepesän paisuntakäyrien alku liikkuu tulistetun ja kostean höyryn rajalla. Jos höyryn lämpötilaa lasketaan, laskematta painetta merkittävästi, kostean höyryn alue saattaa siirtyä korkeapainepesän ja välipainepesän väliseen ylivirtausputkeen.

Ajotavan huomioiminen on erittäin tärkeää Salmisaaren voimalaitoksen höyryturbiinin välipainepesän materiaalien kestävyyskannalta. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisuntakäyrä liikkuu Helen Oy:n turbiineista kaikista riskialtteimmalla alueella: Paisuntakäyrä kulkee väistämättä eroosiokorroosioalueen läpi. Eroosiokorroosion kestävyyttä ei ole huomioitu alkuperäisissä materiaalivalinnoissa, minkä vuoksi turbiinin kulumisen ei voida olettaa pysähtyneen kesän 2017 aikana tehtyjen korjausten jälkeen. Turbiinin kulumiseen voidaan vaikuttaa optimoimalla turbiinin tulohöyryn arvot sellaisiksi, että paisuntakäyrä sijoittuu mahdollisimman oikealle Mollier-diagrammissa. Tämä tapahtuu nostamalla tulohöyryn lämpötilaa tai laskemalla tulohöyryn painetta. Voimalaitoksen prosessi voi kuitenkin rajoittaa lämpötilannostoa. Tulohöyryn paineen lasku vähentää voimalaitoksen tehoa.

Salmisaaren välipaineturbiinin korjaustarpeen minimoimiseksi, Salmisaaren voimalaitoksella tehon laskua ei tule suorittaa laskemalla pelkkää tulohöyryn lämpötilaa. Jos tulohöyryn lämpötilaa lasketaan, tulee huolehtia, että paine laskee samalla. Paineen laskun tulee olla suhteessa lämpötilanlaskun kanssa niin, että paisuntakäyrä ei siirry Mollier-diagrammissa vasemmalle. Jos tulohöyryn painetta lasketaan, mutta lämpötila pidetään samana, paisuntakäyrä siirtyy Mollier-diagrammissa oikealle, pois vakavan eroosiokorroosion alueelta. Kuva 82 esittää materiaalien kannalta optimaaliset paisuntakäyrät Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinille.



Kuva 82. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrät.

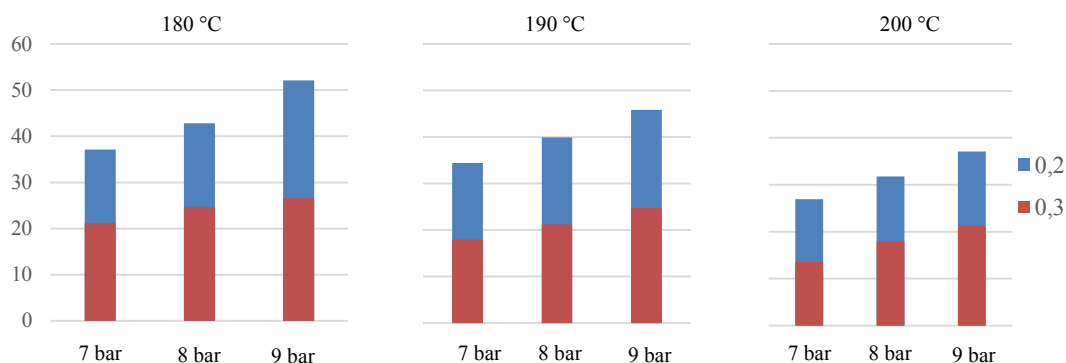
Kuvassa 82 vasemmanpuoleisen käyrän tulohöyryn lämpötila on 220 °C ja paine 9 bar. Käyrä kulkee eroosiokorroosioalueen läpi, mutta lämpötilan ollessa 150 °C höyry on tulistettua, mikä pienentää eroosiokorroosion riskiä kondensoituneen höyryn alueella. Paisuntakäyrä ei kulje vakavan eroosiokorroosioalueen läpi. Tulohöyryn arvoilla 200 °C ja 7 bar sekä 170 °C ja 5 bar turbiinin paisunta osuu samalle sijainnille Mollier-

diagrammissa. Turbiinin vastapaineen tulee olla yli 0,3 bar, jotta turbiinin paisunta ei si-
joitu vesipisaraeroosion alueelle. Kuvassa 82 oikeanpuoleinen käyrä esittää Salmisaaren
voimalaitoksen vp-turbiinin materiaaleille optimaalisimman paisunnan. Paisuntakäyrän
tulohöyryn lämpötila on 200 °C ja paine 3,5 bar. Kyseinen paisuntakäyrä ei kulje eroo-
siokorroosioalueen läpi, eikä pääty vesipisaraeroosion alueelle, jos turbiinin vastapaine
on yli 0,2 bar. Tälle paisuntakäyrälle osuvat myös tulohöyryn pisteet 220 °C ja 5 bar se-
kä 160 °C ja 2,5 bar.

Paisuntakäyrän siirtyminen Mollier-diagrammissa vasemmalle lisää vesipisaraeroosion
määrää kosteuden nousun seurauksena. Vesipisaraeroosioon vaikuttaa turbiinin kosteu-
den lisäksi turbiinin vastapaine. Pienemmillä höyryn paineilla höyryn tiheys on pienem-
pi kuin korkeammilla höyrynpaineilla, minkä vuoksi höyryn tilavuus ja nopeus kasva-
vat. Paineen laskiessa veden tiheys kasvaa, mikä voimistaa iskeytyvien vesipisaroiden
aiheuttamaa painetta. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin vesipisaraeroosion määrän
riippuvuutta turbiinin ajotavasta ja vastapaineesta voidaan arvioida käyttämällä kapp-
leessa 4.2.2 laskettuja vesipisaraeroosion vertailuarvoja. Tulohöyryn parametrien ja tur-
biinin vastapaineiden vaikutusta viimeisten juoksusiipien kärjen vertailuarvoon on laa-
jennettu Taulukossa 18.

Taulukko 18. Tulohöyryn parametrien ja vastapaineen vaikutus Salmisaaren
voimalaitoksen vp-turbiinin jakson 5a juoksusiipien kärjen vesipisaraeroosion vertai-
luarvoon.

Tulohöyryn läm- pötila	Tulohöyryn paine	KLVI:n vastapaine (bar)	Vo0 kosteus (%)	Vesipisaraeroosion vertai- luarvo
180 °C	7 bar	0,2	13,5	37,09 *K
		0,3	12,5	21,20 *K
	8 bar	0,2	14,5	42,79 *K
		0,3	13,5	24,73 *K
	9 bar	0,2	16,0	52,11 *K
		0,3	14,0	26,60 *K
190 °C	7 bar	0,2	13,0	34,40 *K
		0,3	11,5	17,95 *K
	8 bar	0,2	14,0	39,89 *K
		0,3	12,5	21,20 *K
	9 bar	0,2	15,0	45,80 *K
		0,3	13,5	24,73 *K
200 °C	7 bar	0,2	11,5	26,92 *K
		0,3	10,0	13,57 *K
	8 bar	0,2	12,5	31,80 *K
		0,3	11,5	17,95 *K
	9 bar	0,2	13,5	37,09 *K
		0,3	12,5	21,20 *K



Kuva 83. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 18).

Taulukon 18 arvot on esitetty graafisesti Kuvassa 83. Taulukon 18 arvojen tarkastelu osoittaa, että kosteuspitoisuus nousee 1–2 %yks, kun vastapainetta pudotetaan 0,3 barista 0,2 bariin. Vastaava paineen pudotus ja kosteuden nousu lähes kaksinkertaistavat vesipisaraeroosion vertailuarvon. Vesipisaraeroosion vertailuarvon kaksinkertaistumisesta voidaan todeta, että vastapaineen laskeminen vaikuttaa merkittävästi vesipisaraeroosion esiintymiseen. Suurin veripisaraeroosion vertailuarvo on tilanteessa, jossa tulohöyryn paine on korkea, tulohöyryn lämpötila on alhainen ja vastapaine on pieni. Taulukon 18 arvoista tulohöyryn lämpötilan ollessa 180 °C, tulohöyryn paineen 9 bar ja vastapaineen 0,2 bar, vesipisaraeroosion vertailuarvo on suurin (merkitty punaisella). Arvo on lähes nelinkertainen verrattuna vesipisaraeroosion vertailuarvoon, kun tulohöyryn lämpötila on 200 °C, paine 9 bar ja vastapaine 0,3 bar (merkitty sinisellä). Vesipisaraeroosion kannalta optimaalisemmat tulohöyryn lämpötilan ja paineen arvot vastaavat eroosiokorroosion minimointiin optimaalisia tulohöyryn arvoja.

Jos olosuhteet pysyvät vakiona, eroosioaste tasaantuu saavutettuaan korkeimman huipun. Komponenteissa, joissa kyseessä on vesipisaraeroosion aiheuttama materiaalin kuluminen, kulumisen voi vähentyä merkittävästi tai jopa pysähtyä (*eroosioastekäyrä*). Jos vesipisaraeroosion lisäksi materiaali kuluu eroosiokorroosion seurauksena, vastaavaa kulumisen pysähtymistä ei tapahdu olosuhteissa, joissa teräksen pinta ei pääse passivoitumaan. Komponenteissa, joissa kuluminen johtuu eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion yhteisvaikutuksesta, kulumisen oletetaan vakio-olosuhteissa vähenevän. Vähentymisen määrä riippuu vesipisaraeroosion ja eroosiokorroosion suhteesta. Jos olosuhteet muuttuvat, vaurioiden mekanismi, sijainti ja laajuus voivat muuttua. Jos juoksusiipien kärjissä havaitun vesipisaraeroosion määrä kasvaa, vaikutukset näkyvät myös turbiinin staattisissa komponenteissa.

Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinissa suurimmat vauriot pisarat ovat aiheuttaneet viimeiseen johtosiipikiekkoon sekä turbiinin pesään. Turbiinin pesän ja johtosiipikiekkojen materiaali on kovuudeltaan alhaisempaa kuin siipien materiaalin, joten nämä komponentit vaurioituvat juoksusiipiä helpommin. Viimeisen juoksusiipikiekkoon pintaan iskeytyvät pisarat voivat olla kooltaan suuria ja ovat voineet kiihtyä korkeisiin no-

peuksiin juoksusiivissä, mikä selittää havaitun voimakkaan vesipisaraeroosion määrän kiekon pinnoilla. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin paisuntakäyrien loppupää sijoittuu lievän eroosiokorroosion ja lievän vesipisaraeroosion alueelle. Turbiinin pesä on puhtaan vesipisaraeroosion lisäksi alttiina kaksifaasivirtauksen aiheuttamalle FAC:lle ja eroosiokorroosiolle. Vaikka vesipisarot eivät kiihdy höyrynvirtauksessa suuriin nopeuksiin, vesipisaraeroosion ja eroosiokorroosion yhdistelmä kuluttaa matalaseosteista terästä hyvin nopeasti. Jos kaukolämmönvaihtimen vastapainetta lasketaan, höyryn paisunnan seurauksena höyrynnopeus kasvaa ja vesipisarot pääsevät kiihtymään korkeampiin nopeuksiin.

Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin välipainepesän materiaaleiksi on valittu erittäin vähäseostetut hiiliteräkset. Nämä teräslaadut ovat hinnaltaan runsaasti seostettuja teräksiä edullisempia ja sopivat mainiosti Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin käyttölämpötiloihin. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan olettaa, että materiaalien valinnassa ei ole otettu huomioon sitä, että turbiinin paisunta kulkee voimakkaan eroosiokorroosion alueen läpi kuormittaen materiaaleja huomattavasti. Matalaseosteisten hiiliterästen kulumisen on todettu olevan erittäin runsasta vaikeimmilla eroosiokorroosion alueilla ja siksi turbiinin pesä ja johtosiipikiekkot ovat vaatineet useita korjaustoimenpiteitä. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin välipainepesän johtosiipikiekkojen ja pesän jakotasot olivat kärsineet voimakkaasta eroosiokorroosiosta. Eroosiokorroosion voimakkuus täsmää Mollier-diagrammiin merkittyä aluetta.

Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin välipainepesän pinnoittaminen vuosihuollon 2017 aikana oli turbiinille välttämätön toimenpide. Pesän pinnat olivat altistuneet laajoilta alueilta virtausten kiihdyttämälle kulumiselle. Verrattaessa Vuosaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiinin kehitystä Salmisaaren voimalaitoksen välipainepesän eroosiokorroosiovaurioihin, voidaan todeta, että ilman pinnoitusta Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin pesä olisi vaatinut huomattavia korjaustoimenpiteitä seuraavan avauksen yhteydessä. Toisin kuin Salmisaaren voimalaitoksen pesän materiaali, Vuosaaren voimalaitoksen pesän teräslaatu sisältää hieman kromia, mikä lieventää eroosiokorroosion määrää. Lisäksi Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunta sijaitsee Mollier-diagrammissa eroosiokorroosiolle Vuosaaren voimalaitoksen turbiinia alttiimmalle alueelle.

Koska Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesä oli vaihdettu vuonna 2014, ei materiaali ollut ehtinyt menettää merkittävästi paksuuttaan. Ilman pinnoitusta pesä olisi erittäin todennäköisesti menettänyt materiaalivahvuuttaan merkittävästi seuraavaan vuosihuoltoon mennessä. Onnistunut pinnoitus pysäyttää pesän kulumisen. Pinnoitteen sisältämä kromin määrä pysäyttää eroosiokorroosion ja pinnoitteen kovuus on riittävä vastustamaan pisaroiden iskujen aiheuttamaa muodonmuutosta. Kesän 2018 vuosihuollon aikana pystytään arvioimaan, onko Salmisaaren voimalaitoksen välipainepesän pinnoituksesta ollut hyötyä. Teoriassa pinnoitteen tulisi kestää turbiinin olosuhteita, jos pinnoitteen tartunta on ollut riittävä. Todellinen pinnoitteen kesto nähdään vasta seura-

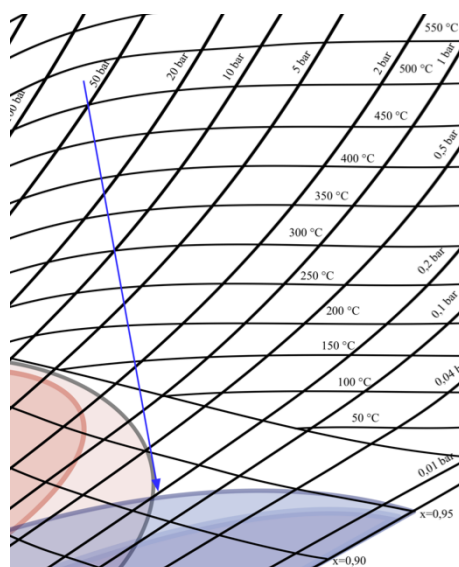
van turbiinihuollon yhteydessä. Jos pinnoite on pysynyt turbiinin pinnoilla lohkeamatta, se suojaa turbiinin pesää pahimmalta eroosiolta, vaikka kuluisikin ainevahvuutta. Jos pinnoite on paikoin lohjennut huonon tartunnan vuoksi, paljastuneet kohdat ovat erittäin alttiita materiaalin kulumiselle. Altistuneet kohdat voivat kulua höyryn virtauksen ja vesipisaroiden aiheuttaman eroosion lisäksi myös korroosion seurauksena, eroosiokorroosion tavoin: paljas matalaseosteinen teräs käyttäytyy anodina, kun vieressä on runsaasti kromia sisältävä pinta.

Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin johtosiipikiekkojen jakotasojen ja pystytiivistepintojen korjauksilla pystyttiin minimoimaan niiden kulumisen seuraavien ajokausien aikana. Kiekkoja ei pystytty kuitenkaan suojaamaan täysin tulevaisuutta varten. Seuraavan huollon yhteydessä johtosiipikiekkojen uusintaa suositellaan. Jaksojen 2-4a pystytiivistepinnat ja jakotasot korjattiin kestäviksi, mutta kiekkojen siipien juurten viereisten reikien kehitystä on mahdoton arvioida. Pahimmassa tapauksessa höyry pääsee tunkeutumaan reikiin tehtyjen tulppausten alta ja irrottamaan reikiin hitsatut tulpat. Kiekkojen 2 ja 2a hunajakennotiivistesten urien viereisen reunan pinnoittaminen suojaa kiekkojen hunajakenttien irtoamiselta. Kiekkojen 3 ja 3a vastaavat kohdat tulevat vaatimaan korjaustoimenpiteitä, jos kiekkoja ei uusita. Kiekon 5a kulumista on vaikea pysäyttää ja siksi kiekko tulisi uusida paremmasta materiaalista valmistetulla kiekolla seuraavan huollon yhteydessä. Jos johtosiipikiekot päätetään uusida, kiekkojen materiaalin tulisi kestää nykyistä paremmin eroosio- ja korroosiota. Varma vaihtoehto olisi valita yli 12 % kromia sisältävä ruostumaton teräs, esimerkiksi siivissä käytetty X12Cr13. Ruostumaton teräs on kuitenkin haastavampaa käsitellä tai hitsata ja hinnaltaan huomattavasti kalliimpaa. Jos kiekkojen materiaaliksi valitaan teräs, joka sisältää noin 2,5 % kromia (esimerkiksi 10CrMo9-10) kiekkojen kulumista pystytään hidastamaan merkittävästi ilman, että materiaalikustannukset nousevat korkeiksi. Suositeltava vaihtoehto on valita kiekkoihin 2,5 % kromia sisältävä teräs ja pinnoittaa ruiskuttamalla tai hitsaamalla kulumiselle altteimmat kohdat; eli jakotasot, pystytiivistepinnat ja hunajakennotiivistesten urien reunat.

Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin viimeinen johtosiipikiekko jatkaa tasaista kulumista. Jos turbiinin olosuhteet eivät merkittävästi muutu, seuraavien viiden vuoden aikana juoksusiiven pinta ei menetä ainepaksuutta yhtä paljon kuin se on kulunut tähän mennessä, koska vesipisaraeroosioasteen huippuarvo on todennäköisesti saavutettu ja eroosioaste tasaantunut viimeiseen tasaisen kulumisen vaiheeseen. Vesipisaraeroosion lisäksi kiekon pinta kuitenkin kuluu eroosio- ja korroosion seurauksena. Vesipisaraeroosion ja eroosio- ja korroosion suhdetta ei tiedetä. Kulumisen voimistuu, jos turbiinin vastapaine laskee ja kosteus kasvaa. Jos johtosiipikiekot päätetään uusida seuraavan huollon aikana, johtosiipikiekon kulumisen kasvun katsotaan olevan siedettävää. Jos kiekkoja ei aiota uusida, viimeinen johtosiipikiekko ei salli kosteuden nousun tuomaa kulumisen lisääntymistä.

Hanasaaren ja Vuosaaren B-voimalaitosten turbiineissa eroosiokorroosion riski on Salmisaaren voimalaitoksen vastapaineturbiinia pienempi. Kaikkien laitosten turbiinien materiaalien keston vaikuttaa höyrynkosteuden määrä. Jos höyrynkosteus turbiinin loppupäässä kasvaa, kaksifaasivirtauksen FAC:n määrä lisääntyy myös Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiinien pesissä. Vaikka Hanasaaren ja Vuosaaren B-voimalaitosten turbiinien paisunnat eivät kulje vastaavasti materiaaleille haastavilla alueille, tulee niilläkin ajaa materiaalien kannalta mahdollisimman optimaalisesti. Optimaalisella ajotavalla saadaan turbiinista enemmän sähkötehoa, koska kosteuden kasvu pienentää turbiinin hyötysuhdetta.

Hanasaaren voimalaitoksen turbiinien osalta tilanne ei vastaa Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin ongelmia. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin paisunta ei kulje Mollier-diagrammissa eroosiokorroosioalueen läpi. Jos turbiinin vastapaine laskee alle 0,2 barin, turbiinin paisuntakäyrän loppupää osuu määritetylle vesipisaraeroosion alueelle. Koska Hanasaaren voimalaitoksen turbiini toimii aktioperiaatteella, kosteuspitoisuus nousee korkeaksi ennen viimeisiä juoksusiipiä. Viimeisissä juoksusiivissä voi alkaa näkyä merkkejä vesipisaraeroosiosta. Vesipisaraeroosion voidaan kuitenkin katsoa olevan erittäin minimaalista. Vesipisaraeroosion laajuus ei tule Hanasaaren voimalaitoksen turbiinien juoksusiivissä nousemaan niin korkeaksi, että siitä seuraisi merkittävää haittaa turbiinin käytölle. Koska turbiini ei altistu varsinaiselle eroosiokorroosiolle, turbiinin vahingot eivät ole yhtä vakavat kuin Salmisaaren voimalaitoksen turbiinissa, vaikka kosteuspitoisuus nousisi. Turbiinin pesän ja väliottojen kanavien kaksifaasivirtauksen FAC:n määrä kasvaa kosteuspitoisuuden noustessa. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesä on valmistettu teräksestä, joka sisältää korkeintaan 0,3 % kromia. Pieni määrä kromia teräksessä vähentää eroosiokorroosion ja FAC:n määrää.



Kuva 84. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinien paisunnan rajakäyrä.

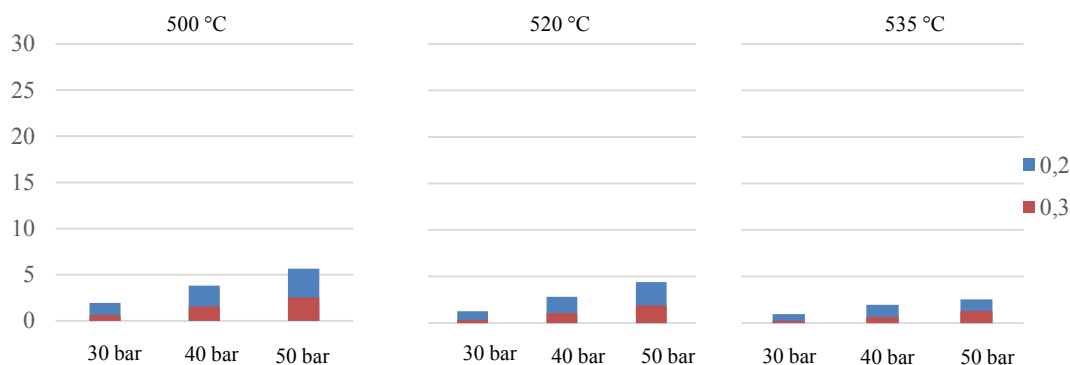
Koska Hanasaaren voimalaitoksessa höyry välitulistetaan, ei tulohöyryn lämpötila voi laskea merkittävän paljon alemmas. Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiinien tu-

lohöyryn lämpötila on rajoitettu niin, ettei se voi laskea alle 500 °C:een [86]. Kuva 84 esittää Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrän. Tulohöyryn lämpötilan ollessa 500 °C tulohöyryn paineen tulisi nousta yli 50 bariin, jotta paisuntakäyry siirtyisi Mollier-diagrammissa eroosiokorroosioalueelle. Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin kaltaisten eroosiokorroosio-ongelmien ilmeneminen Hanasaaren voimalaitoksen turbiineissa on erittäin epätodennäköistä. Jos vastaavia ongelmia havaitaan, vika on todennäköisesti voimalaitoksen vesikemiassa. Turbiinien tulohöyryn arvot vaikuttavat turbiinien loppupään kaksifaasisen FAC:n ja vesipisaraeroosion esiintymiseen.

Jos tulohöyryn lämpötila laskee 500 °C:een ja paine on 50 bar, höyryn paisuessa 0,2 bariin asti, turbiinin loppupään kosteus nousee Mollier-diagrammin perusteella 8 %:iin. Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa alennetaan, vastapaineen oletetaan laskevan, minkä seurauksena loppupään kosteuspitoisuus nousee. Tällöin tulohöyryn alhaisen lämpötilan ja korkean paineen yhdistelmällä turbiinin loppupään paisunta ulottuu työssä määritetylle vesipisaraeroosion alueelle.

Taulukko 19. Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiinin viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvo eri tulohöyryn parametreilla ja vastapaineilla (siipien kärjen nopeus 250 m/s, 3000 rpm).

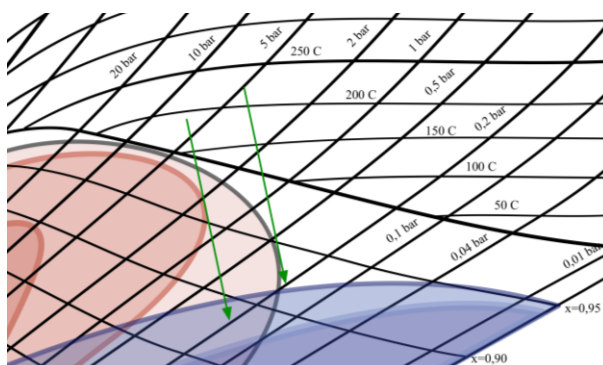
Tulohöyryn lämpötila	Tulohöyryn paine	KLVI:n vastapaine (bar)	Vo0 kosteus (%)	Vesipisaraeroosion vertailuarvo
500 °C	30 bar	0,2	5,0	1,95 *K
		0,3	3,5	0,64 *K
	40 bar	0,2	7,0	3,83 *K
		0,3	5,5	1,58 *K
	50 bar	0,2	8,5	5,64 *K
		0,3	7,0	2,55 *K
520 °C	30 bar	0,2	4,0	1,25 *K
		0,3	2,5	0,33 *K
	40 bar	0,2	6,0	2,81 *K
		0,3	4,5	1,05 *K
	50 bar	0,2	7,5	4,39 *K
		0,3	6,0	1,88 *K
535 °C	30 bar	0,2	3,5	0,96 *K
		0,3	2,0	0,21 *K
	40 bar	0,2	5,0	1,95 *K
		0,3	3,5	0,64 *K
	50 bar	0,2	7,0	2,55 *K
		0,3	5,0	1,30 *K



Kuva 85. Hanasaaren voimalaitoksen vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 19).

Kuvassa 85 on esitetty Taulukon 19 arvot (huom. kuvaajan y-akseli on puolet Kuvan 83 y-akselista). Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvot ovat huomattavasti Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin arvoja pienemmät. Eri turbiinien arvot eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, koska arvoon vaikuttaa myös turbiinikohtainen vakio K. Vakion K arvot ovat aktioturbiineissa lähellä toisiaan, joten vesipisaraeroosion vertailuarvojen kokoluokkia voidaan käyttää Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitosten turbiinien keskinäiseen vertailuun. Riippumatta turbiinin tulohöyryn tai vastapaineen arvoista, Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvo ei ylitä Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin tarkastelussa asetettua vesipisaraeroosion vertailuarvon rajaa $10 \cdot K$. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin juoksusiipien ei oleteta kärsivän vesipisaraeroosiosta. Suurin vastapaineen alentamisen ja kosteuspitoisuuden nousun vaikutus Hanasaaren voimalaitoksen vp-turbiineissa tulee olemaan kaksifaasisen virtauksen FAC:n lisääntyminen.

Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisuntakäyrä saattaa kulkea eroosiokorroosioalueen läpi. Turbiinin paisunnan loppupää voi myös sijoittua vesipisaraeroosion alueelle. Vuosaaren voimalaitoksen vp-turbiinin juoksusiivissä paineen lasku vaikuttaa aktioturbiineja vähemmän. Sekä aktio että reaktioturbiineissa vastapaineen laskun muutokset jakautuvat tasaisesti turbiinin jaksoihin. Koska reaktioturbiineissa paine laskee myös viimeisissä juoksusiivissä, kosteuden muutos ei näy yhtä voimakkaasti Vuosaaren voimalaitoksen turbiinissa kuin Salmisaaren ja Hanasaaren voimalaitosten turbiineissa. Vastapaineen lasku nostaa kuitenkin myös reaktioturbiinin juoksusiipien vesipisaraeroosion määrää. Merkittävin vaikutus vastapaineen laskulla on Vuosaaren voimalaitoksen vp-turbiinin pesän peräpäähän ja viimeisiin väliottoihin, sillä vastapaineen lasku vaikuttaa merkittävästi viimeisten juoksusiipien jälkeen olevien materiaalien altistumiseen vesipisaraeroosiolle.

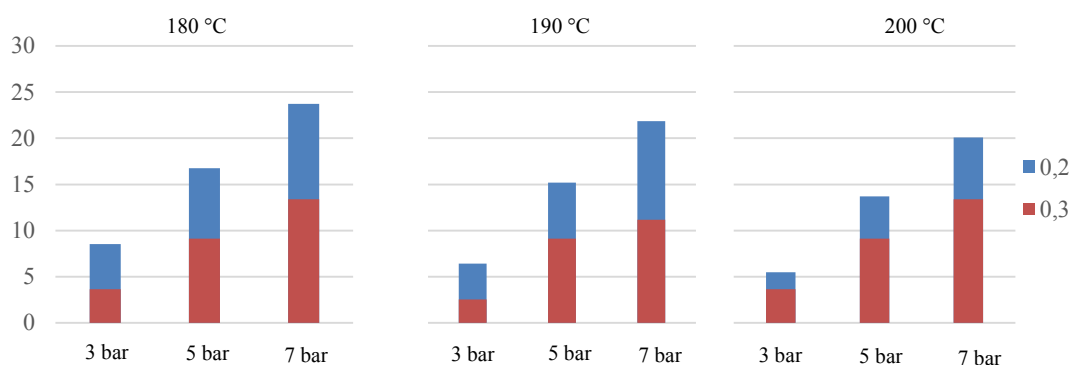


Kuva 86. Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrät.

Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin paisunnan rajakäyrät vastaavat Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin rajakäyriä, käyrät on esitetty Kuvassa 86a. Turbiinin materiaaliongelmiin minimoimiseksi paisuntakäyrän tulisi sijaita kuvassa oikeanpuoleisen käyrän oikealla puolella. Oikeanpuoleisen käyrän tulohöyryn arvot ovat esimerkiksi 220 °C ja 5 bar, 200 °C ja 4 bar sekä 180 °C ja 3,5 bar. Jos oikeanpuoleinen rajakäyrä on välttämätöntä ylittää, paisunta ei saisi siirtyä kuitenkaan vasemmanpuoleisen rajakäyrän vasemmalle puolelle. Vasemmanpuoleisen rajakäyrän tulohöyryn arvoja ovat esimerkiksi 220 °C ja 9 bar, 190 °C ja 6,5 bar sekä 170 °C ja 5 bar. Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot eri tulohöyryn parametreilla ja vastapaineilla on esitetty Taulukossa 20.

Taulukko 20. Vuosaaren voimalaitoksen vp-turbiinin viimeisten juoksusiipien vesipisaraeroosion vertailuarvot eri tulohöyryn arvoilla ja vastapaineilla, siiven tuloreunan nopeudella 312 m/s.

Tulohöyryn lämpötila	Tulohöyryn paine	KLVI1:n vastapaine (bar)	Vo0 kosteus (%)	Vesipisaraeroosion vertailuarvo
180 °C	3 bar	0,2	7,5	8,54 *K
		0,3	6,0	3,64 *K
	5 bar	0,2	10,5	16,74 *K
		0,3	9,5	9,14 *K
	7 bar	0,2	12,5	23,72 *K
		0,3	11,5	13,39 *K
190 °C	3 bar	0,2	6,5	6,42 *K
		0,3	5,0	2,53 *K
	5 bar	0,2	10,0	15,19 *K
		0,3	9,5	9,14 *K
	7 bar	0,2	12,0	21,87 *K
		0,3	10,5	11,16 *K
200 °C	3 bar	0,2	6,0	5,47 *K
		0,3	4,5	2,05 *K
	5 bar	0,2	9,5	13,71 *K
		0,3	8,0	6,48 *K
	7 bar	0,2	11,5	20,08 *K
		0,3	10,0	10,12 *K



Kuva 87. Vuosaaren B-voimalaitoksen vp-turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot (Taulukko 20).

Taulukon 20 arvot on esitetty graafisesti Kuvassa 87. Koska Vuosaaren voimalaitoksen vp-turbiini toimii reaktioperiaatteella, viimeisten juoksusiipien tuloreunan paine on todellisuudessa korkeampi kuin turbiinin vastapaine. Höyrynkosteuspitoisuus on myös oletettavasti alhaisempi kuin Taulukkoon 20 listatut kosteuspitoisuudet. Taulukkoon listattujen arvojen perusteella voidaan kuitenkin vetää johtopäätöksiä eri tulohöyryn ja vastapaineiden arvojen vaikutuksesta turbiinin viimeisten juoksusiipien tuloreunaan vesipisaraeroosion esiintymiseen. Tulohöyryn lämpötilan laskeminen lisää vesipisaraeroosion määrää, mutta suurempi vaikutus on tulohöyryn ja vastapaineen nostamisella. Vuosaaren voimalaitoksen turbiinin arvoja ei voida verrata suoraan Hanasaaren ja Salmisaaren vesipisaraeroosion vertailuarvoihin. Vuosaaren vp-turbiinin viimeisten turbiinin juoksusiipien tuloreunassa havaittiin merkkejä vesipisaraeroosiosta, mikä osoittaa, että Vuosaaren turbiinin vesipisaraeroosion vertailuarvot ovat oikeassa kokoluokassa suhteessa Salmisaaren ja Hanasaaren voimalaitosten vastapaineturbiinien vertailuarvoihin. Vuosaaren voimalaitoksen turbiinin materiaalit sallivat kaukolämmön menoveden alentamisesta aiheutuvan vastapaineen laskun, jos turbiinin paisunta pysyy Mollier-diagrammissa Kuvan 86 vasemmanpuoleisen rajakäyrän oikealla puolella. Turbiinin viimeisten juoksusiipien ja kaukolämmönvaihtimien tilaa tulee tarkkailla vesipisaraeroosion ja kaksifaasisen virtauksen FAC:n lisääntymisen varalta.

Kaukolämpövesien lämpötilan muutos vaikuttaa merkittävästi kaukolämmönvaihtimiin. Höyryn kosteuden kasvaessa vesipisaraeroosion riski kasvaa myös kaukolämmönvaihtimissa. Koska KLV1 ja KLV2 ovat usein identtiset, vesipisaraeroosion vaikutus näkyy enemmän KLV1:ssä tulohöyryn viileyden vuoksi. Kaukolämmön menoveden lämpötilan laskun oletettiin vaikuttavan vain KLV2:n vastapaineeseen. Kuitenkin tämän työn tutkimusten perusteella kaukolämmön menoveden lämpötilan alentaminen vaikuttaa myös KLV1:n vastapaineeseen alentavasti, mikä nostaa KLV1:n vesipisaraeroosion määrää. Jos kaukolämmönvaihtimien olosuhteet eivät muutu merkittävästi, päällimmäisten panssaritankojen kulumisen odotetaan hidastuvan tai mahdollisesti pysähtyvän, eroosioasteen kehittymisen hidastuttua, standardoidun eroosiokäyrän (Kuva 12) mukaisesti.

Kun vastapaineturbiinin ajotapaa muutetaan, höyryn virtaus kaukolämmönvaihtimille johtavissa kanavissa muuttuu. Vastapaine vaikuttaa höyryn tilavuuteen ja nopeuteen. Alhaisilla vastapaineilla höyryn tilavuus on suurempi kuin korkeammilla vastapaineilla. Suuri tilavuus aiheuttaa suurilla massavirroilla kaukolämmönvaihtimille johtavien kanavien suuremman kuormituksen. Tilavuuden noustessa myös höyryn virtausnopeus kasvaa. Vastapaineen lasku kuormittaa kaukolämmönvaihtimille vieviä kanavia enemmän.

Salmisaaren voimalaitoksen molempien kaukolämmönvaihdinten vaippojen on todettu kuluneen. Putkipakettien päällä olevien umpipankojen kuluminen on Salmisaaren voimalaitoksen KLV1:ssä ollut paikoin voimakkaampaa kuin KLV2:ssa. KLV2:ssa kuluminen on jakautunut tasaisemmin höyryn tulokanavaan nähden. Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten molempien vaihdinten vaippa vaatii lähitulevaisuudessa uusimista, jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa päätetään laskea, suositellaan vaihdinten tulokanavan kohdalla olevien vaipan levyjen vaihtoa paremmin vesipisaraeroosiota ja eroosiokorroosiota kestävään materiaaliin. Vesipisaraeroosion määrä voidaan minimoida valitsemalla kovuudeltaan mahdollisimman kova materiaali. Kovien terästen hitsattavuus on usein teräslaatuja, joilla on pienempi kovuus, haastavampaa. Hyvä vaihtoehto olisi myös pinnoittaa kaukolämmönvaihtimet höyryn tulokanavan kohdalta. Pinnoituksen avulla vaipan perusaineeksi voidaan valita materiaali, joka on helposti hitsattavissa. Ennen Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten vaippojen uusimista tai vahvistamista, kaukolämmön menoveden laskua ei suositella.

Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten kaukolämmönvaihdinten päällimmäisten putkien ja tulokanavan tilaa suositellaan tarkkailtavan erityisellä huomiolla. Vaikka vastapaineen alentamisella ei oleteta olevan yhtä suurta vaikutusta Hanasaaren ja Vuosaaren voimalaitosten kaukolämmönvaihtimiin kuin Salmisaaren voimalaitoksen vaihtimiin, vastapaineen lasku voi muuttaa höyryn virtauksen käyttäytymistä odottamattomalla tavalla.

Vastapaineturbiinin paisunnan muutokset vaikuttavat turbiinien ja kaukolämmönvaihtimien lisäksi turbiiniin kytkettyihin laitteisiin ja putkistoihin. Kosteuspitoisuuden lisääntyminen tai paisunnan sijoittuminen eroosiokorroosion alueelle rasittavat komponentteja, joihin höyry ohjataan turbiinin kosteilta väliotoilta.

Koska vastapaineturbiinien väliotoista osa höyrystä ohjataan LEL:eille, LEL:ien kuntoa suositellaan tarkkailtavan. Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin kaikki väliotot ovat kostean höyryn alueella. Höyryn lämpötila, paine ja kosteuspitoisuus saattavat aiheuttaa eroosiokorroosiota myös LEL:illä. Turbiinin väliotoista tuleva kostea höyry voi aiheuttaa eroosiota tai eroosiokorroosiota myös turbiiniin liittyvässä putkistoissa. Merkittävimpiä kohtia ovat putkistojen käyrät ja muotokappaleet, joissa höyrynvirtaus ei ole suoraviivaista. Putkistojen eroosiokorroosio on ilmiönä vastaava kuin höyryturbiinin pesää kuluttava eroosiokorroosio. Höyrynpaineen lasku aiheuttaa höyryn tilavuuden ja

virtausnopeuden kasvun. Suurempi kaksifaasinen virtaus rasittaa putkistoja vähäisempää virtausta enemmän. Putkistojen eroosiokorroosiota voidaan ehkäistä vaihtamalla putkien uusinnan yhteydessä käytetyn putkistomateriaalin enemmän seostettuun, mie-luiten runsaasti kromia sisältävään, teräkseen. Kromiterästen hitsattavuus on kuitenkin matalaseosteisia hiiliteräksiä haastavampaa ja kyseiset teräslaadut ovat hinnaltaan kal-liimpia. Kulumiselle altteimmat putkistojen käyrät voisi olla suotavaa valmistaa eroo-siokorroosiota kestävästä teräksestä, mutta tällöin on kiinnitettävä erityistä huomiota putkien liitoskohtaan. Kahden eri teräksen toisiinsa liittäminen voi aiheuttaa galvaanista korroosiota vähemmän jalossa putkessa. Salmisaaren voimalaitoksen putkiston osia on eroosiokorroosiosta johtuen jouduttu uusimaan. Putkistoissa höyryputkien materiaali-va-linta tehdään putken sisällä kulkevan höyryn lämpötilan ja paineen perusteella. Myös Salmisaaren voimalaitoksen vp-turbiinin väliottoja on jouduttu uusimaan ennen turbii-nin uusimista [91].

Eroosiokorroosion kannalta kriittisiksi komponenteiksi voidaan luokitella myös kostean höyryn alueella sijaitsevat venttiilit. Venttiilit on usein valmistettu valuina tai hitsattuina rakenteina, ja materiaaleina on käytetty vastaavia painelaiteteräksiä kuin putkistoissa tai muissa komponenteissa.

Kaukolämmönmenoveden lämpötilan alentaminen lisää kaukolämpöveden virtausmää-rää. Laitosten kaukolämpöpumput joutuvat suuremmalle rasitukselle, kun viileämpää kaukolämpövedettä joudutaan pumppaamaan enemmän. Pumppujen kohdalla tulee ottaa huomioon, että niiden kapasiteetti riittää, mutta lisäksi on huomioitava myös, etteivät paine-erojen muutokset johda pumppujen kavitointiin. Pääsääntöisesti pumput kestävät hetkellisen kavitoinnin, mutta pitkään jatkuessaan pumppujen materiaalit kärsivät ja haurastuvat.

Tämän diplomityön tutkimusten oleelliset johtopäätökset ovat seuraavat:

- Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrä kulkee vaikean eroosiokorroosion alueen läpi Mollier-diagrammissa. Turbiini on valmistettu te-räslaaduista, jotka eivät kestä eroosiokorroosiota.
- Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin tulohöyryn lämpötilaa ja painetta suositellaan tarkasteltavaksi. Työssä osoitettiin paisuntakäyrät, jotka parantaisi-vat turbiinin materiaalien kestoja.
- Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisuntakäyrä ei kulje eroosiokor-roosioalueen läpi Mollier-diagrammissa. Hanasaaren voimalaitoksen prosessi es-tää paisuntakäyrän sijoittumisen eroosiokorroosion alueelle.
- Vuosaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiinin tulohöyryn lämpötilaa ja painet-ta suositellaan tarkistettavaksi. Vuosaaren voimalaitoksessa turbiinin paisunta-käyrä kulkee eroosiokorroosioalueen läpi.

- Salmisaaren voimalaitoksen turbiinin viimeisissä juoksusiivissä havaittiin vesipisaraeroosiota. Vesipisaraeroosion määrä lisääntyy, jos kosteusturbiinin loppupäässä lisääntyy.
- Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa halutaan alentaa, turbiinien vastapaineita tulee tarkkailla. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinien ja kaukolämmönvaihtimien vesipisaraeroosion vertailuarvot eivät nouse korkeiksi, vaikka vastapaine putoaisi ja kosteus kasvaisi. Vuosaaren voimalaitoksen turbiini sallii kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamisen, mutta kanavien ja putkistojen tilaa tulee tarkkailla. Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten vaipat tulee vahvistaa ennen kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamista.
- Tarkkailemalla vastapaineturbiinien viimeisiä juoksusiipiä, pystytään arvioimaan vesipisaraeroosion määrää.

7. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä tutkittiin vastapaineturbiinien eroosiokorroosiota ja vesipisaraeroosiota. Tutkimuksessa analysoitiin Helenin kolmen voimalaitoksen vastapaineturbiinien kuntoa sekä prosessidataa ja verrattiin niitä turbiinien paisuntakäyrien sijoittumiseen Mollier-diagrammissa.

Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisunnan todettiin sijoittuvan Mollier-diagrammissa vakavan eroosiokorroosion alueelle. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin pesän ja johtosiipikiekkojen materiaalien valinnassa ei ole otettu huomioon pesän paisunnan sijaintia ja materiaaleiksi on valittu vähäseosteisia hiiliteräksiä. Materiaalit eivät ole kestäneet turbiinin olosuhteita, joten johtosiipikiekoille ja turbiinin pesälle jouduttiin tekemään korjaustoimenpiteitä. Korjaukset suoritettiin hitsaamalla ja pinnoittamalla. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin pesän odotetaan kestävän turbiinin olosuhteet, mutta johtosiipikiekot vaativat tulevaisuudessa korjaamista. Johtosiipikiekot suositellaan korvattavaksi paremmin eroosiokorroosiota kestäväällä materiaalilla ja viimeinen johtosiipikiekko vesipisaraeroosiota kestävästä materiaalista valmistetulla kiekolla. Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin viimeisissä juoksusiivissä havaittiin lievää vesipisaraeroosiota. Laskennallisten arvioiden perusteella juoksusiipiin osuu pisaroita juoksusiipien materiaalien myötölujuutta korkeammalla paineella. Turbiinin juoksusiipiin osuvan paineen ja laskennallisen vesipisaraeroosioasteen avulla työssä määritettiin Mollier-diagrammin vesipisaraeroosion riskialue. Myös Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihtimilla havaittiin eroosiokorroosiota ja vesipisaraeroosiota. Kaukolämmönvaihdinten tilaa tulee tarkkailla. Vuosaaren ja Hanasaaren vastapaineturbiinien pesät on valmistettu paremmin eroosiokorroosiota kestävästä materiaalista. Vuosaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin paisunta osuu Mollier-diagrammin eroosiokorroosioalueelle ja turbiinissa havaittiin Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin vaurioihin verrattavaa kulumista. Vuosaaren voimalaitoksen turbiinin viimeisissä juoksusiivissä havaittiin vesipisaraeroosiota. Vuosaaren voimalaitoksen välipaineturbiinin vauriot olivat Salmisaaren voimalaitoksen välipaineturbiinia lievemmät. Hanasaaren voimalaitoksen välipaineturbiinien paisunnat eivät sijoitu Mollier-diagrammiin määritetyille materiaaleille haastaville alueille. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin pesässä havaittiin eroosiokorroosioon verrattavaa FAC:ta, mutta ilmiön voimakkuus on Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiineita lievempi. Hanasaaren voimalaitoksen turbiinin pesä on alkuperäinen, eikä kulumisen odoteta aiheuttavan ongelmia.

Työssä tutkittiin tekijöitä, jotka vaikuttavat vastapaineturbiinien paisunnan sijaintiin Mollier-diagrammissa. Turbiinin vastapaineeseen vaikuttaa kaukolämpövesien lämpöti-

lat. Jos kaukolämmön menoveden lämpötilaa päätetään alentaa, kaukolämmön paluuv veden lämpötilaa ja turbiinien vastapaineita tulee tarkkailla. Jos turbiinin vastapaine laskee alle 0,2 bar vesipisaraeroosion määrä lisääntyy. Salmisaaren voimalaitoksen kaukolämmönvaihdinten vaipat tulee korjata ennen kaukolämmön menoveden lämpötilan alentamista. Eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion minimoimiseksi Helen Oy:n voimalaitosten turbiineille määritettiin paisunnan rajakäyrät. Turbiinin paisunnan sijoituksessa Mollier-diagrammissa rajakäyrän oikealle puolelle turbiinin eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion määrä minimoituu. Voimalaitoksen prosessi voi rajoittaa turbiinin tulohöyryn arvojen säätämistä. Salmisaaren ja Vuosaaren voimalaitosten turbiinien tulohöyryn arvoja suositellaan tarkasteltavaksi ja mahdollisuuksien mukaan tulohöyryn lämpötiloja nostaa ja paineita laskea.

Materiaalien eroosiokorroosion ja vesipisaraeroosion kestoja voisi tulevaisuudessa testata asettamalla turbiinien pesiin eri materiaaleista valmistettuja koepaloja. Koepaloja tarkkailemalla voitaisiin saada selville, minkälaisia olosuhteita eri materiaalit todellisuudessa kestävät. Turbiineihin voisi asettaa myös kosteutta mittaavat anturit. Anturien avulla olisi mahdollista arvioida tarkemmin turbiinien vesipisaraeroosiota. Lisäksi voimalaitosten vesikemioiden tilaa voisi analysoida tarkemmin. Helen Oy:n voimalaitoksilla pH säädetään ammoniakilla, minkä seurauksena turbiineissa vesipisaroiden pH on muuta höyryä alhaisempi, mikä lisää eroosiokorroosion määrää.

LÄHTEET

- [1] S. Laakkonen, P. Rasila, Kaukolämpöprosessi, Höyryturbiinit -kurssi, 22.–23.3.2017, Hannu Järvinen Consulting, Vantaa, .
- [2] Helen Oy, Energian tuotanto Helsingissä, web page. Available (accessed 12.09.2017): <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/>.
- [3] Helen Oy, Hanasaaren voimalaitos, web page. Available (accessed 12.09.2017): <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/voimalaitokset/hanasaari/>.
- [4] Helen Oy, Salmisaaren voimalaitos, web page. Available (accessed 12.09.2017): <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/voimalaitokset/salmisaari/>.
- [5] R. Kehlhofer, B. Rukes, F. Hannemann, F. Stirnimann, Combined-Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants (3rd Edition), PennWell, 2009, .
- [6] Helen Oy, Vuosaaren voimalaitokset, web page. Available (accessed 12.9.2017): <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/voimalaitokset/vuosaari/>.
- [7] Helen Oy, Salmisaaren B-voimalaitoksen pääputkistokaavio, 2015, .
- [8] Ivaska, Jarmo, Johtava asiantuntija, Helen Oy, Haastattelu 10.4.2017.
- [9] S.D. Cramer, B.S. Covino Jr., 53. Corrosion of Steam Turbines, in: ASM Handbook, Volume 13C - Corrosion: Environments and Industries, ASM International, 2006, .
- [10] Enthalpy-Entropy Diagram for Steam, NTNU, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho, Aartum, I, 2001, .
- [11] A. Kareoja, Höyryprosessit ja höyryturbiinit, Höyryturbiinit -kurssi, 22.–23.3.2017, Hannu Järvinen Consulting, Vantaa, .
- [12] Kunnossapitoyhdistys ry (ed.). 2004. Korroosiokäsikirja. 4. painos ed. KP-Media Oy.
- [13] Helen Oy, Hanasaaren B-voimalaitos, T3, sivuleikkaus, 2004, .
- [14] F.J. Heymann, 3.6 Steam Turbine Design, in: Power Generation Technologies (2nd Edition), Elsevier, 2014, .

- [15] H.S. Kirols, D. Kevorkov, A. Uihlein, M. Medraj, The effect of initial surface roughness on water droplet erosion behaviour, *Wear*, Vol. 342–343, 2015, pp. 198–209.
- [16] F.J. Heymann, 23. Liquid Impingement Erosion, in: *ASM Handbook, Volume 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology*, ASM International, 1992, .
- [17] Guide wheel NT5a, in: Helen Oy, Salmisaaren B-voimalaitoksen välipaineturbiini, Doosan Skoda Power, 2012, .
- [18] T.H. McCloskey, R.B. Dooley, W.P. McNaughton, *Turbine Steam Path Damage: Theory and Practice, Volume 1: Turbine Fundamentals*, EPRI, California, USA, 1999, .
- [19] Rätty, Tero, Asiantuntija, Helen Oy, Haastattelu 1.8.2017.
- [20] VGB PowerTech e.V., VGB-Standard: Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants / Industrial Plants, 3.th ed. VGB PowerTech Service GmbH, 2011, .
- [21] Helen Oy, Katri Valan lämpöpumppulaitos, Helen Oy, web page. Available (accessed 28.02.2017): <https://www.helen.fi/helen-oy/tietoa-yrityksesta/energiantuotanto/voimalaitokset/katri-vala/>.
- [22] T. Viander, Kaukolämpöverkon käytön optimointi, Diplomi-insinööri, Lappeenranta teknillinen yliopisto. Diplomityö, 2014, Available: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/102299/Diplomityo_Tero_Viander_08122014.pdf?sequence=2.
- [23] Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/68/EU, 68, 2014. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0068&from=fi>.
- [24] J. Kaivosoja, Kaukolämpöverkon prosessitutkimus, Helen Oy, Helsinki, Valmet Automation Inc, 2016, .
- [25] Kaukolämmön sopimusehdot, voimassa 14.12.2010 alkaen, Helen Oy, 2010, .
- [26] Huusko, Raimo, Kunnonhallinnan asiantuntija, Helen Oy, Haastattelu 20.9.2017.
- [27] Y.Y. Kachuriner, V.G. Orlik, Specifics of initial steam condensation and its influence on corrosion damage in turbines, *Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 2, 2007, pp. 118–122.
- [28] V.F. Rezinskikh, V.F. Gutorov, B.S. Fedoseev, Corrosion Cracking of Steam Turbine Disks Operating in the Zone of Phase Transformation, *Power Technology and Engineering*, Vol. 36, No. 1, 2002, pp. 14–19.
- [29] L.A. Zhuchenko, V.V. Kortenkov, Y.A. Sakhnin, V.V. Ermolaev, Reconditioning of Steam Turbine Blades and Rotor Disks, *Power Technology and Engineering*, Vol. 36, No. 2, 2002, pp. 64–66.

- [30] A.S. Leyzerovich, 12.3.10 Water Drop Erosion of LP Blading, in: *Steam Turbines for Modern Fossil-Fuel Power Plants*, Fairmont Press, Inc, 2008, .
- [31] A.C. Reardon, 8. Steel Products and Properties, in: *Metallurgy for the Non-Metallurgist* (2nd Edition), ASM International, 2011, .
- [32] *Wet-Steam Turbines for Nuclear Power Plants*, PennWell, 2005, .
- [33] F.C. Campbell, 18.2.5 Erosion-Corrosion, in: *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, ASM International, 2008, .
- [34] J.R. Davis, *Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*, Maney Publishing, 2001, .
- [35] A. Shirzadi, S. Jackson, 2.5.2 FAC and Erosion Corrosion, in: *Structural Alloys for Power Plants – Operational Challenges and High-Temperature Materials*, Elsevier, 2014, .
- [36] *Failure Analysis and Design Considerations: Fluid Velocity Effects*, *Materials Performance*, Vol. 56, No. 6, 2017, pp. 92.
- [37] L. Yang, *Techniques for Corrosion Monitoring*, Woodhead Publishing, 2008, .
- [38] R.B. Eckert, *Field Guide to Internal Corrosion Mitigation and Monitoring for Pipelines*, NACE International, 2016, .
- [39] G.J. Crits, *Notes on Water and Ion Exchange - Ion-Exchange Technology and Water Treatment*, Chemical Publishing Company Inc, 2012, .
- [40] S. Banerjee, A.K. Tyagi, *Functional Materials - Preparation, Processing and Applications*, Elsevier, 2012, .
- [41] J.A. Hesketh, P.J. Walker, Effects of Wetness in Steam Turbines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 219, No. 12, 2005, pp. 1301–1314.
- [42] V. Burt, *Corrosion in the Petrochemical Industry* (2nd Edition), ASM International, 2015, pp. 292–338.
- [43] A. Strang, W.M. Banks, R.D. Conroy, M.J. Goulette, 55.2 Erosion Corrosion, in: *Advances in Turbine Materials, Design and Manufacturing*, Maney Publishing for IOM3, the Institute of Materials, Minerals and Mining, 1997, .
- [44] B. Buecker, Beware of flow-accelerated corrosion, *Chemical Engineering (United States)*, Vol. 120, No. 3, 2013, pp. 38–40.
- [45] O.A. Povarov, G.V. Tomarov, V.N. Zharov, Erosion-corrosion of Saturated Steam Turbine Plant Elements, *Thermal Engineering*, Vol. 37, No. 12, 1990, pp. 643–647.

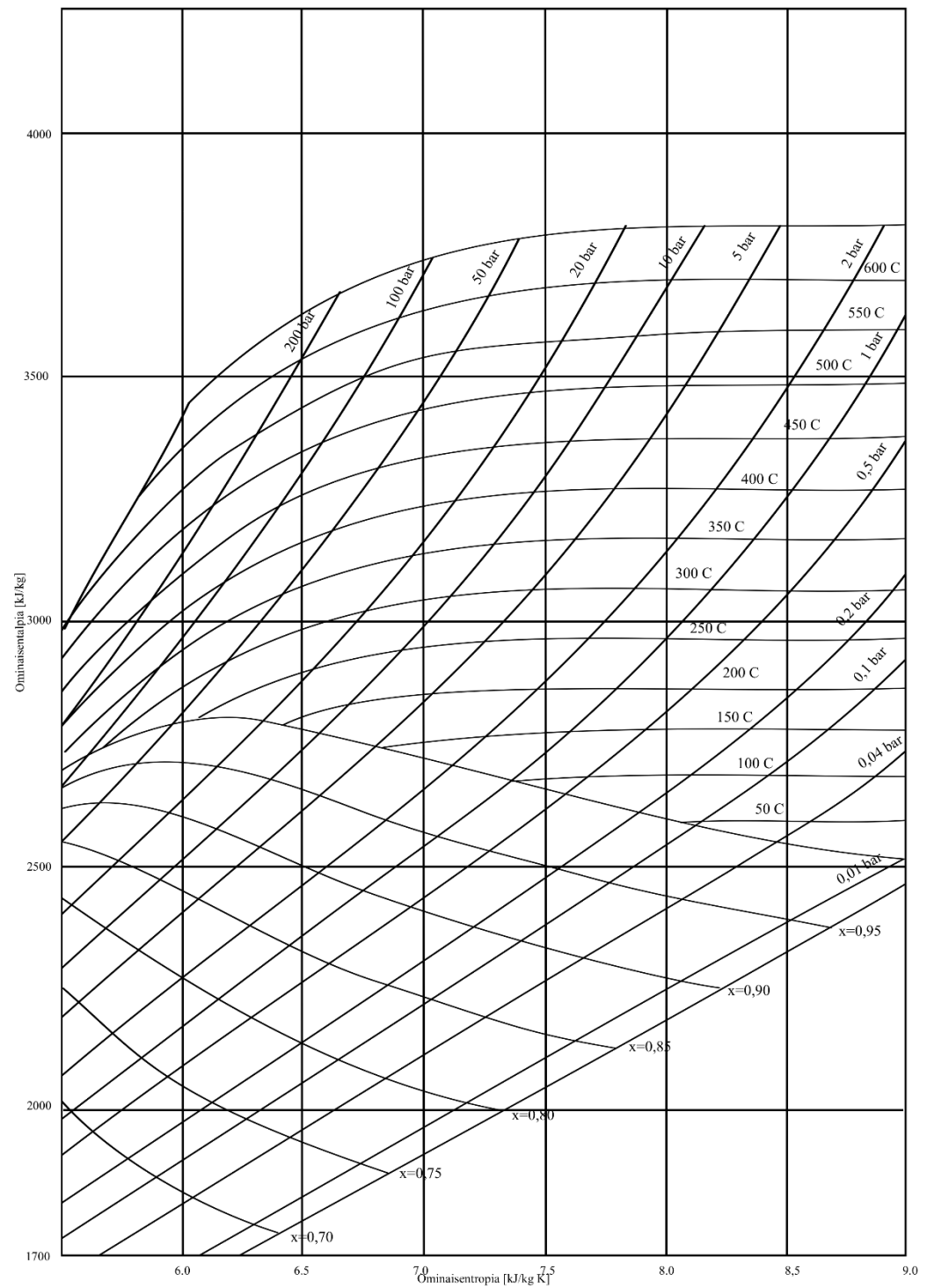
- [46] Properties of Saturated Steam - SI Units, The Engineering ToolBox, web page. Available (accessed 5.8.2017): https://www.engineeringtoolbox.com/saturated-steam-properties-d_101.html.
- [47] M. Schorr, B. Valdez, J. De Dios Ocampo, Erosion-corrosion in industrial steam turbines, *Materials Performance*, Vol. 48, No. 9, 2009, pp. 62–65.
- [48] N.V. Averkina, I.V. Zheleznyak, Y.Y. Kachuriner, I.A. Nosovitskii, V.G. Orlik, V.I. Shishkin, Wet-steam erosion of steam turbine disks and shafts, *Power Technology and Engineering*, Vol. 44, No. 5, 2011, pp. 386–393.
- [49] A. Shibli, 13.4.5.2 Steam Turbine Erosion, in: *Coal Power Plant Materials and Life Assessment - Developments and Applications*, Elsevier, 2014, .
- [50] *Stahlschlüssel – Key to Steel*, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Germany, 2010, .
- [51] H.S. Kirols, M.S. Mahdipoor, D. Kevorkov, A. Uihlein, M. Medraj, Energy based approach for understanding water droplet erosion, *Materials & Design*, Vol. 104, 2016, pp. 76–86.
- [52] M. Ahmad, M. Casey, N. Sürken, Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials, *Wear*, Vol. 267, No. 9–10, 2009, pp. 1605–1618.
- [53] G.C. Gardner, Events Leading to Erosion in the Steam Turbine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 178, No. 23, 1963, .
- [54] M. Ahmad, M. Schatz, M.V. Casey, Experimental investigation of droplet size influence on low pressure steam turbine blade erosion, *Wear*, Vol. 303, No. 1–2, 2013, pp. 83–86.
- [55] A. Afzalifar, T. Turunen-Saaresti, A. Grönman, Origin of droplet size underprediction in modeling of low pressure nucleating flows of steam, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 86, 2016, pp. 86–98.
- [56] B.S. Mann, V. Arya, HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades, *Wear*, Vol. 254, No. 7–8, 2003, pp. 652–667.
- [57] W. Wróblewski, S. Dykas, Two-fluid model with droplet size distribution for condensing steam flows, *Energy*, Vol. 106, 2016, pp. 112–120.
- [58] M.S. Mahdipoor, H.S. Kirols, D. Kevorkov, P. Jedrzejowski, M. Medraj, Influence of impact speed on water droplet erosion of TiAl compared with Ti6Al4V, *Scientific Reports*, Vol. 5, 2015, pp. 14182.
- [59] R. Kallio, Pisaraeroosion eliminointi teollisuushöyryturbiinien matalapainesivissä, *Diplomi-insinööri, Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Energiatekniikan laitos. Diplomityö*, 2009, .

- [60] N. Fujisawa, T. Yamagata, S. Takano, K. Saito, R. Morita, K. Fujiwara, F. Inada, The influence of material hardness on liquid droplet impingement erosion, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 288, 2015, pp. 27–34.
- [61] H.C. ASM International, 19.2 Metallurgy of Laser Hardening, in: *ASM Handbook, Volume 04 - Heat Treating*, ASM International, 1991, .
- [62] B.S. Mann, V. Arya, B.K. Pant, Influence of Laser Power on the Hardening of Ti6Al4V Low-Pressure Steam Turbine Blade Material for Enhancing Water Droplet Erosion Resistance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 20, No. 2, 2011, pp. 213–218.
- [63] H.C. ASM International, 9. Classification and Designation of Carbon and Low-Alloy Steels, in: *ASM Handbook, Volume 01 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, 1990, .
- [64] P. Sundberg, Salmisaari B-voimalaitoksen matalapainepesän vaurioiden syiden selvitys ja tarvittavien toimenpiteiden suunnittelu, *Diplomi-insinööri, Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Energiatekniikan laitos*, 1998, .
- [65] Helen Oy, Salmisaaren voimalaitoksen höyryturbiinin välipainepesän poikkileikkaus, *Doosan Skoda Power*, 2012, .
- [66] Salmisaaren höyryturbiinin turbiinipassi, *Doosan Skoda Power*, 2012, .
- [67] The Design Guide Subcommittee of the AIAA Design Engineering, Technical Committee, 3.6 Galvanic Series, in: *AIAA Aerospace Design Engineers Guide (5th Edition)*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, .
- [68] ASM International, Crevice Corrosion, in: *Dictionary of Metals*, ASM International, 2012, pp. 60.
- [69] Proceq Equotip 2 Portable Hardness Tester, Ashtead Technology, web page. Available (accessed 17.10.2017): <http://www.ashtead-technology.com/rental-equipment/proceq-equotip-2-portable-hardness-tester/>.
- [70] Taulukot.com: Mekaniikka, web page. Available (accessed 1.8.2017): http://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka/.
- [71] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, *Materials science and engineering : an introduction*, 8th ed., SI version ed. John Wiley, Hoboken, NJ, 2011, .
- [72] 1.4006 Material Data Sheet, Deutsche Edelstahlwerke, web page. Available (accessed 28.9.2017): https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4006_en.pdf.
- [73] 1.4923 Material Data Sheet, Edelstahlwerke Südwestfalen GmbH, 2001, .
- [74] Data table for: Carbon steel S355J0, Steel ss, web page. Available (accessed 5.10.2017): <http://www.steelss.com/Carbon-steel/s355j0-.html>.

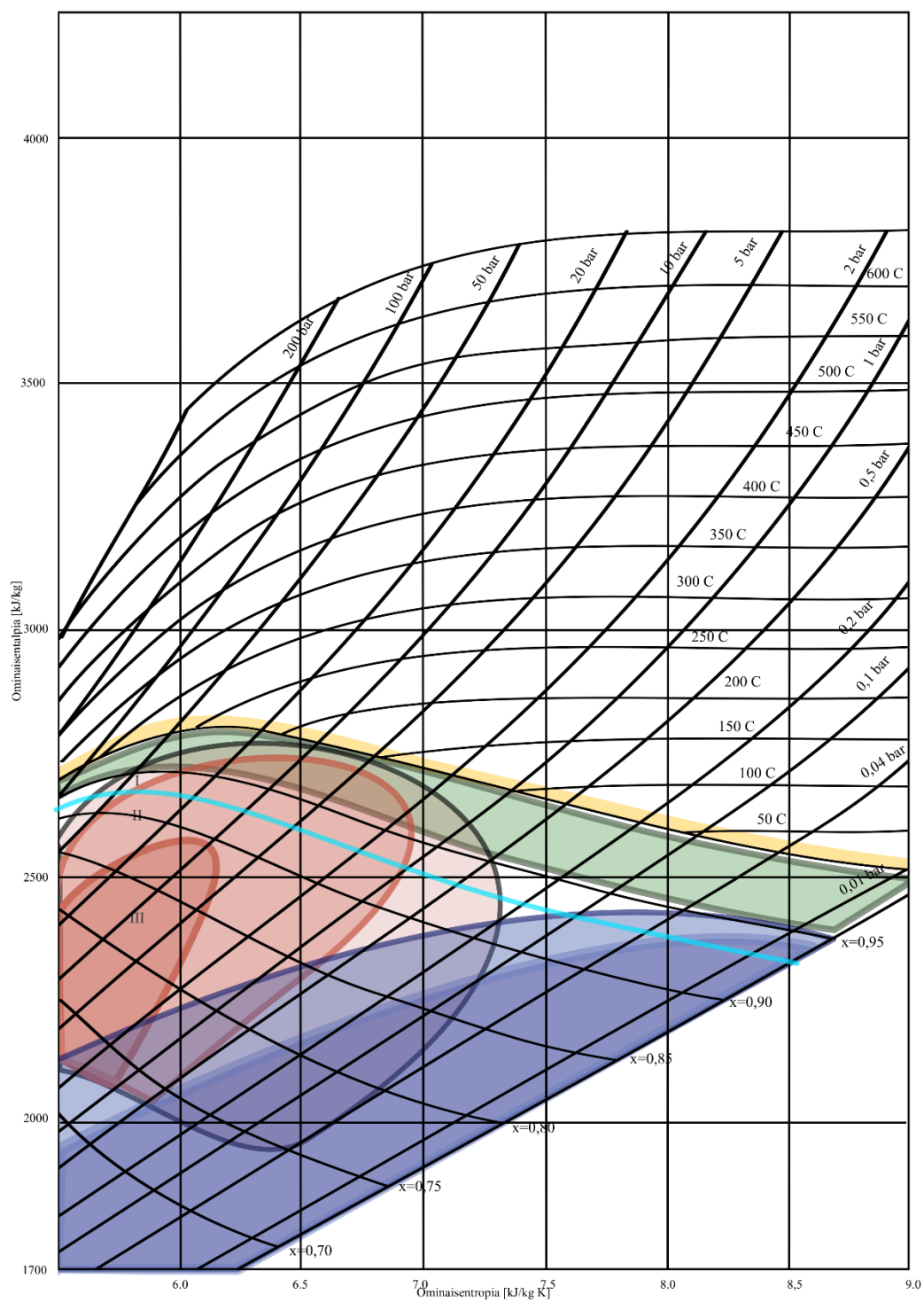
- [75] EN10025 S235JR Steel plate, Henan Bebon International, web page. Available (accessed 05.10.2017): <http://www.ss400steel.com/Carbon-and-low-alloy-steel/EN10025-S235JR.html>.
- [76] 1.4922/1.4923 Datasheet, Metalcor, web page. Available (accessed 05.10.2017): <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/70/>.
- [77] E.P. Gyftopoulos, G.P. Beretta, Thermodynamics - Foundations and Applications, Dover Publications, 2005, .
- [78] R. Manglik, Heat Transfer Fluid Flow Data Books, Genium Publishing Corporation, 2015, .
- [79] C.J. Biermann, Handbook of Pulping and Papermaking (2nd Edition), Elsevier, 1996, .
- [80] B. Lee, K. Riu, S. Shin, S. Kwon, Development of a Water Droplet Erosion Model for Large Steam Turbine Blades, KSME International Journal, Vol. 17, No. 1, 2003, pp. 114-121.
- [81] Rintala, Juha, Technical Manager, Telatek Service Oy, Haastattelu 29.3.2017.
- [82] P. Vuoristo, Coatings and surface treatments -lecture, Tampere University of Technology, Department of Materials Science, .
- [83] Day-ahead prices, Nord Pool, web page. Available (accessed 30.9.2017): <http://www.nordpoolspot.com/Market-data/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=chart>.
- [84] V.A. Malyshevskii, T.G. Semicheva, E.I. Khlusova, Effect of Alloying Elements and Structure on the Properties of Low-Carbon Heat-Treatable Steel, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 43, No. 9, 2001, pp. 331–335.
- [85] J. Seppälä, Johtosiipikiekköjen kunnostuksen loppuraportti, Telatek Service Oy, 2017, .
- [86] Rasila, Petteri, Asiantuntija, Helen Oy, Haastattelu 23.2.2017.
- [87] Huhtikuun 2017 sää ja tilastot, Ilmatieteen laitos, web page. Available (accessed 28.10.2017): <http://ilmatieteenlaitos.fi/huhtikuu>.
- [88] Toukokuun 2017 sää ja tilastot, Ilmatieteen laitos, web page. Available (accessed 28.10.2017): <http://ilmatieteenlaitos.fi/toukokuu>.
- [89] Rasila, Petteri; Grönroos, Sofia, Helen Oy, Haastattelu 5.6.2017.
- [90] S. Guo, P. Liu, Z. Li, Estimation of exhaust steam enthalpy and steam wetness fraction for steam turbines based on data reconciliation with characteristic constraints, Computers & Chemical Engineering, Vol. 93, 2016, pp. 25–35.

[91] Mäkelä, Reino, Kunnossapidon asiantuntija, Helen Oy, Haastattelu 1.3.2017.

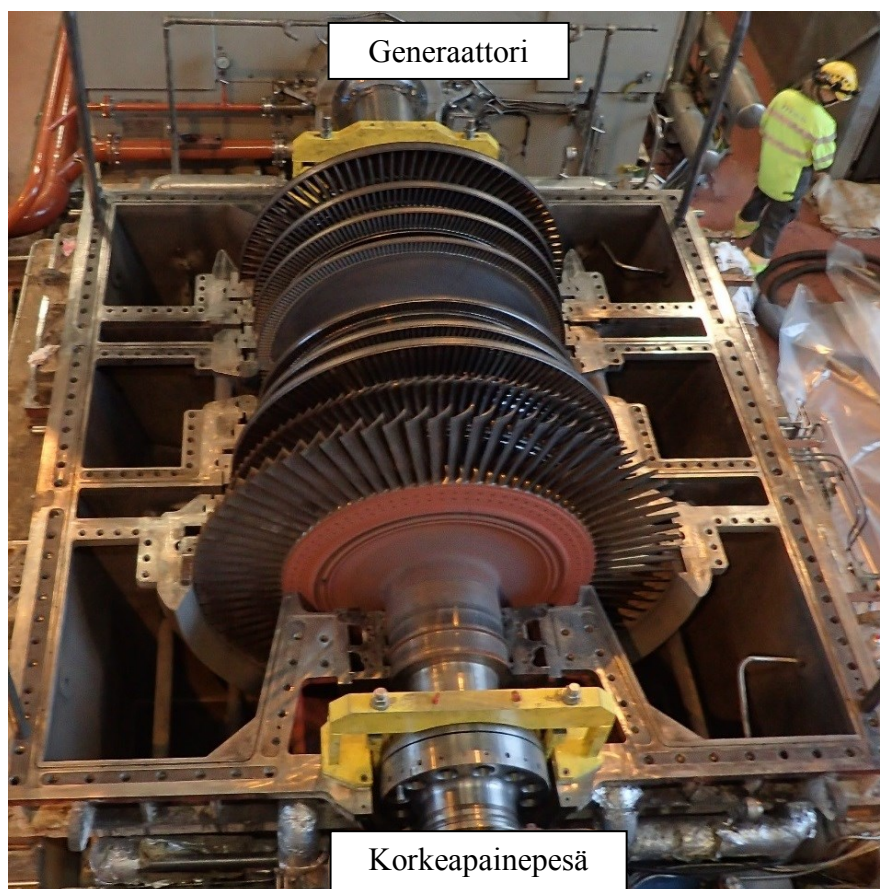
LIITE 1: MOLLIER-DIAGRAMMI



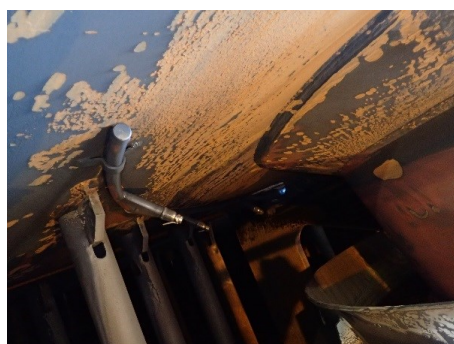
LIITE 2: TYYPILLISET MATERIAALIONGELMAT MOLLIER-DIAGRAMMIN ERI ALUEILLA



LIITE 3: SALMISAAREN VP-TURBIININ PESÄ 2017



Alapesä gen puoli:



Alapesä kp-puoli:



Yläpesä, gen puoli:

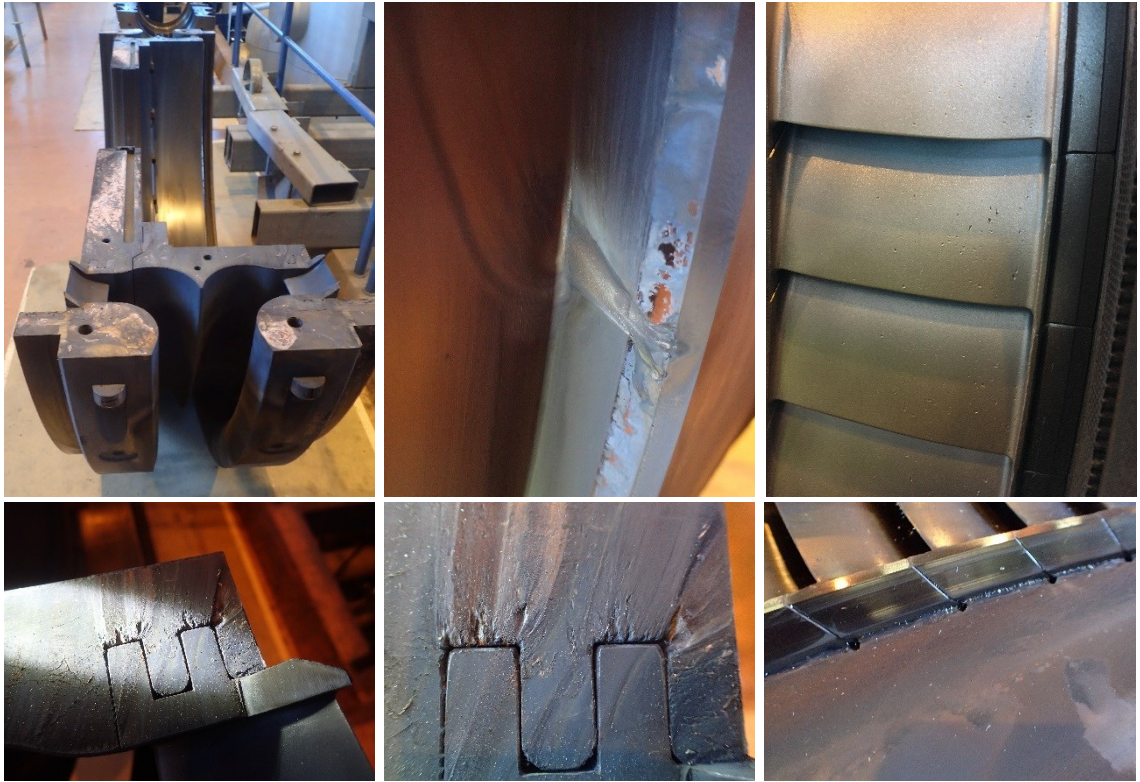


Yläpesä kp-puoli:



LIITE 4: SALMISAAREN JOHTOSIIPIKIEKOT 2017

Johtosiipikiekko 1 ja 1A



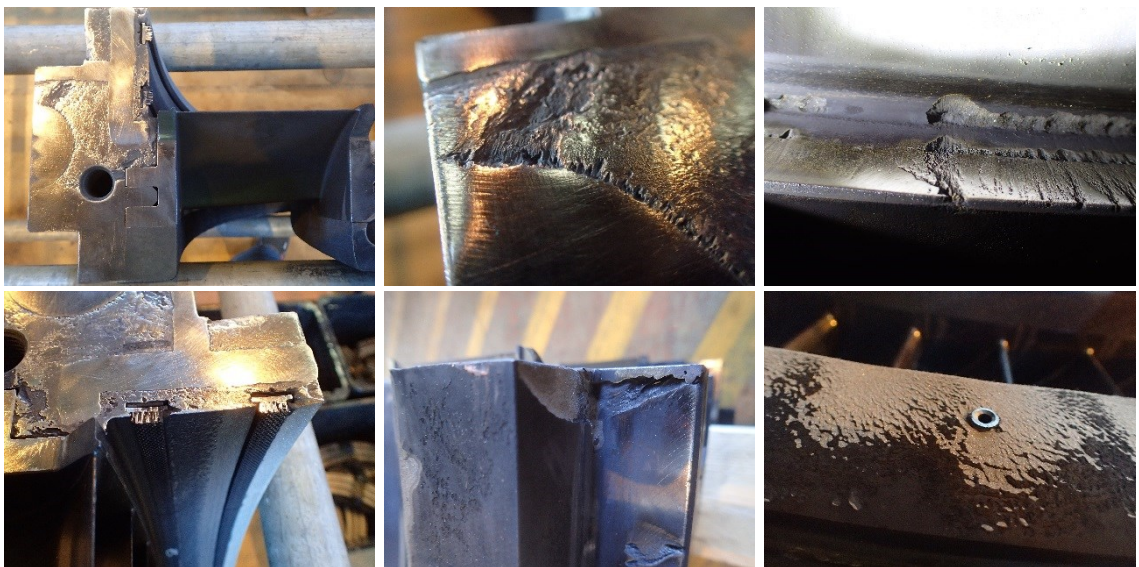
Johtosiipikiekko 2



Johtosiipikiekko 2A



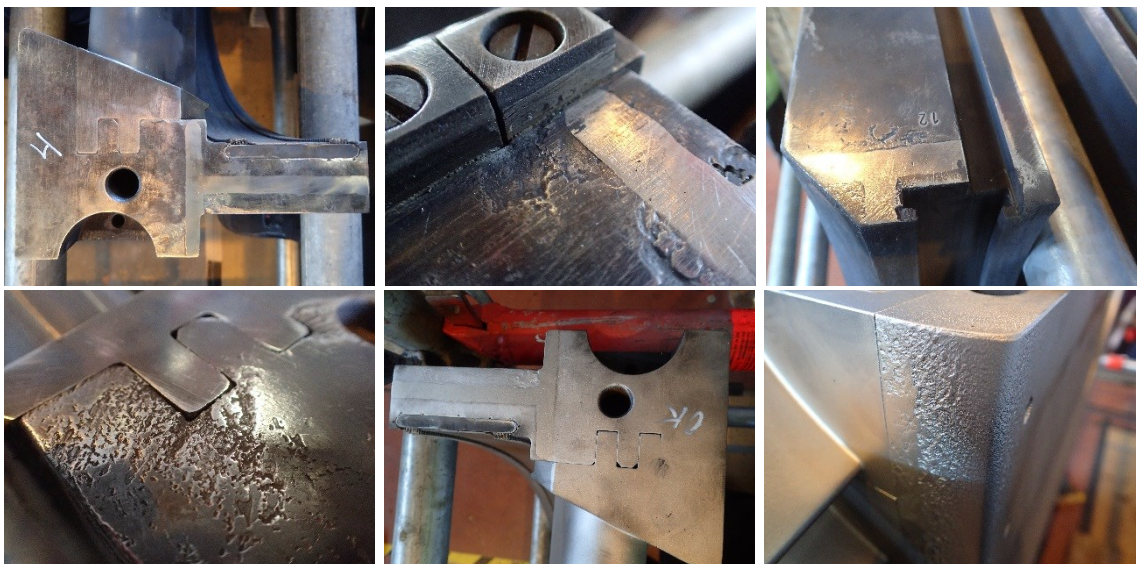
Johtosiipikiekko 3



Johtosiipikiekko 3A



Johtosiipikiekko 4



Johtosiipikiekko 4A

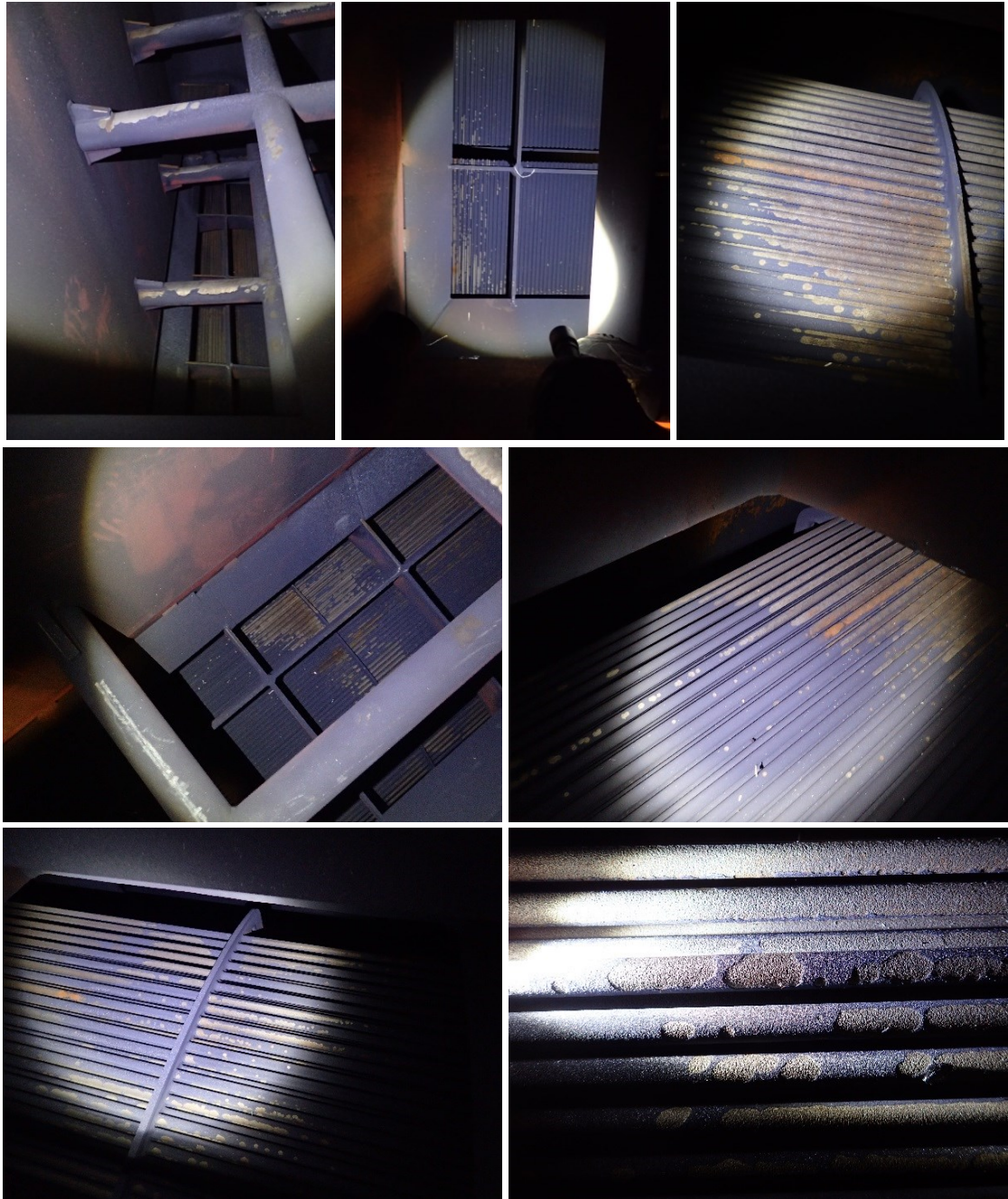


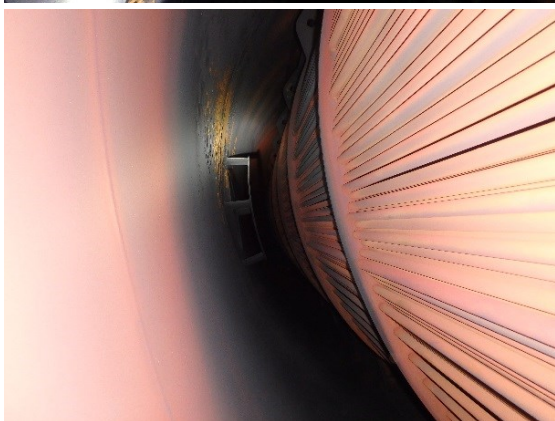
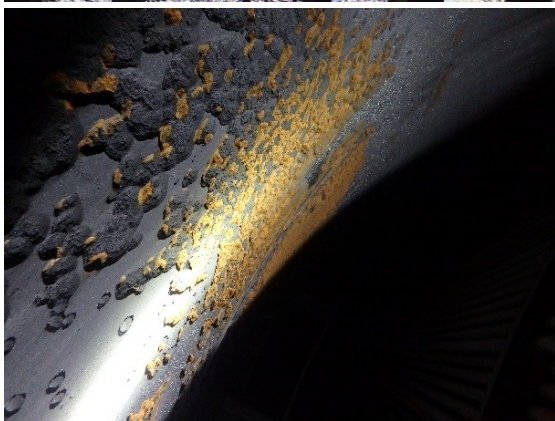
Johtosiipikiekko 5A



LIITE 5: SALMISAAREN KAUKOLÄMMÖNVAIHTIMET 2017

KLV 1





KLV 2:

